

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Л. Д. БЕЛЬКИНД, О. Н. ВЕСЕЛОВСКИЙ,
И. Я. КОНФЕДЕРАТОВ и Я. А. ШНЕЙБЕРГ

ИСТОРИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

*Издание второе,
переработанное*

*Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования РСФСР
в качестве учебного пособия
для энергетических высших учебных заведений
и факультетов*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1960 ЛЕНИНГРАД

В книге излагается история развития энергетической техники — гидроэнергетики, теплоэнергетики и электроэнергетики — от древнейших времен до середины XX в.

Книга может служить учебным пособием; она предназначена для студентов энергетических вузов и факультетов, а также для инженеров и техников, работающих в области энергетики и энергопромышленности.

*Л. Д. Белькинд, О. Н. Веселовский, И. Я. Конфедератов
и Я. А. Шнейберг*

Редакт

Сдано
Т-12858
Тираж

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие является вторым, полностью переработанным изданием учебника «История техники», выпущенного Госэнергоиздатом в 1956 г. В ряде рецензий и отзывов на первое издание учебника была дана общая положительная оценка книги; одновременно высказывались пожелания более подробного освещения развития техники в текущем столетии.

При переработке учебника авторы стремились по возможности учесть пожелания и критические замечания, а также опыт более чем десятилетнего преподавания курса истории техники в Московском энергетическом институте.

Второе издание носит название «История энергетической техники», что отражает основное содержание книги. В отличие от первого издания в ней освещено развитие гидроэнергетики, теплоэнергетики и электроэнергетики от момента их возникновения до наших дней. История других отраслей техники в учебнике не рассматривается.

Придавая большое значение выявлению важнейших закономерностей развития техники, авторы сочли целесообразным посвятить этим вопросам главу «Техника и закономерности ее развития».

В развитии техники можно отметить большое число разнообразных качественных изменений, которые особенно заметны, если они распространяются на многие отрасли техники. Середина XX в. характеризуется небывальными по своим масштабам изменениями во всех ведущих отраслях техники. Эти изменения можно расценивать как начало научно-технического переворота. Анализ особенностей развития современной техники будет предметом последующих исследований в области истории техники.

Что касается истории развития радиотехники, то, учитывая, что последняя непосредственно не относится к энер-

гетике, авторы сочли целесообразным дать краткое освещение этого вопроса ввиду все более возрастающего влияния радиоэлектроники на развитие энергетической техники.

Главы 1, 2, 3, 7 и § 11-1 написаны И. Я. Конфедератовым, главы 4—6, 8—10, 12, 13 и § 11-2 написаны совместно Л. Д. Белькиным, О. Н. Веселовским и Я. А. Шнейбергом.

Авторы отдают себе отчет в том, что настоящее учебное пособие не лишено недочетов, и с благодарностью примут все замечания и пожелания, которые просят направлять по адресу:

Москва, Ж-114, Шлюзовая набережная, 10, Госэнергоиздат.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ДО ПРОМЫШЛЕННОГО ПЕРЕВОРОТА

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ТЕХНИКА И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЕЕ РАЗВИТИЯ

1-1. ТЕХНИКА. ИСТОРИЯ ТЕХНИКИ

Определение понятия
«техника».
Энергетическая
техника

Наукой установлено, что главной силой, определяющей существование и развитие общества, является производство разнообразных материальных благ, без которых общество не может существовать и развиваться. Эти материальные блага — пища, одежда, обувь, жилище, топливо и необходимые для производства орудия — создаются в процессе труда. За многие тысячелетия жизни общества процесс труда претерпел значительные изменения. Простейший физический труд, не требовавший от своего исполнителя почти ничего, кроме напряжения мышц, заменен высококвалифицированным трудом, требующим от своего исполнителя серьезных познаний и умений для управления сложными машинами и приборами. Но как бы ни изменялся процесс труда, он не может осуществляться без средств труда.

Маркс определял *средства труда* как материальные вещи или комплексы вещей, которые человек ставит между собой и предметом труда для воздействия на этот предмет труда. Воздействие на предмет труда может быть самым разнообразным: механическим, химическим, тепловым и т. п., а в зависимости от этого средство труда принимает конкретную форму молота, реактора, печи и т. п.

К средствам труда относятся не только те из них, которые оказывают непосредственное воздействие на предмет труда и носят название *орудий труда*. Для создания усло-

вий, при которых процесс труда может беспрепятственно и эффективно выполняться, помимо орудий труда, требуется ряд средств труда, обеспечивающих освещение, отопление, энергоснабжение, транспорт.

Совокупность всех вместе взятых средств труда и составляет содержание понятия «техника».

Откуда взялось это название? Оно произошло от древнегреческого слова *τεχνη* — «техне», что означает умение, мастерство. Это слово и сейчас применяется для оценки мастерства артистов, музыкантов, спортсменов, где производимый ими эффект зависит преимущественно от их личных качеств.

Эффект труда в гораздо большей степени зависит от используемых средств труда, чем от личных качеств. Сами умелый слесарь, например, не сможет при помощи ручных орудий изготовить столько болтов, сколько их может изготовить за то же время специальный болторезный станок-автомат. Поэтому и словом «техника» в отношении трудовых процессов постепенно стали все более характеризовать не мастерство исполнителя, а применяемые им средства труда, которые и называют «техникой».

Нужно помнить, что подобно тому как отдельный человек не управляется законами, которыми управляется человечество, или как одна газовая молекула не подчиняется законам, присущим газам как совокупности многих миллиардов молекул, так и отдельный технический объект — не техника и закономерностям, характерным для техники в целом, не подчиняется.

Техника — понятие собирательное. Это *вся совокупность средств труда*, находящихся в распоряжении общества на данной ступени его развития.

Техника создается людьми. Особое свойство высокоорганизованной материи — мышление — дает человеку возможность сознательно использовать вещество и энергию природы в процессе производства материальных благ. Это значит, что техника не может реализовать фантастических идущих в разрез с закономерностями объективного мира мечтаний человека. Природа покоряется человеком путем познания ее законов, применения этих законов в процессе труда. Воплощением познания законов природы являются технические объекты. Таким образом, техника создается на основе познания законов природы. Для использования в технической практике познание законов природы может быть на отдельных этапах развития грубым, приближен-

ым, неточным. Так, например, применяя кремнёвое рубило или получая огонь путем трения, первобытный человек не знал количественных соотношений, выражаемых законами механики и термодинамики, но он знал качественную форму проявления внутренних взаимосвязей явлений, познанную им путем опыта, практики. В историческом движении от незнания к знанию, с уточнением и расширением познания уточнялись и расширялись технические приемы и конструктивные формы средств труда.

Явления природы, привлекаемые человеком в процессе труда, определяют собой конструктивные формы средств труда. Для процессаковки нужен тяжелый молот, для процесса резания нужен острый нож, для процесса аккумуляции энергии нужна упругая пружина и т. п.

Любой процесс труда необходимо содержит в себе изменение предмета труда. Это может быть изменение геометрической формы (ковка, прокатка, резание и т. п.), изменение структуры материала (закалка, отжиг, полимеризация и т. п.), изменение состава (окисление, получение сплавов, синтетиков и т. п.) и возможные иные изменения. Но всякое изменение (формы, структуры, состава и т. п.) неизбежно связано с соответствующим изменением энергии как в пределах одного ее вида (теплота плавит металл), так и при переходах ее из одного вида в другой (теплота преобразована в механическую работу). Поэтому все производственные процессы являются энергетическими.

Таким образом, в процессе труда человек использует вещество и энергию природы. Он либо использует *первичную* энергию природы (биологическую, гидравлическую, тепловую, лучистую и др.), либо преобразует ее во *вторичную* (например, в электрическую), затем при посредстве орудия труда направляет энергию в той или иной ее форме на вещество предмета труда, где энергия обуславливает желательный процесс изменения формы, состава, структуры и т. п., в результате чего получается намеченный продукт труда.

Приведенное положение справедливо для любого уровня развития техники. Первобытный человек использовал свою биологическую энергию, направляя ее на выполнение работы в виде ударов одним камнем по другому с целью придать последнему форму топора. К. Маркс раскрыл это положение для машинного производства середины XIX в., т. е. для более высокого уровня развития техники, когда писал о совокупности машин, состоящей из трех

необходимых частей; машины-двигателя (генератора энергии), передаточного механизма (передатчика энергии) и рабочей машины, которая за счет полученной ею энергии желательным образом изменяет предмет труда.

Техника служит не только для производства материальных благ; она непосредственно воздействует и на методы воспроизведения и распространения культурных ценностей.

Так, техника литья дает возможность воспроизведения бронзовых скульптур-памятников; современные машины позволяют создавать художественные строительные и архитектурные детали и т. п. Техника книгопечатания способствует широкому распространению бессмертных творений художников слова, передовых идей великих мыслителей человечества. Техника радио и телевидения сделала доступными живое слово и творческие образы для миллионов радиослушателей и телезрителей.

Таким образом, техника обеспечивает общество не только материальными, но и культурными благами, удовлетворяет его потребности в культурных ценностях.

Но радиоприемник или телевизор — это не только средство удовлетворения культурных запросов, это один из элементов сложных средств труда диктора, дающих ему возможность быть увиденным и услышанным одновременно миллионами людей.

Техника широко вошла в быт, заменяя старые средства домашнего труда более совершенными и производительными, приводимыми в действие всюду проникающей энергией электрического тока.

А как быть с так называемой «военной техникой»? Она, безусловно, не входит в совокупность средств труда, так как различные виды вооружения не орудия, не средства труда, а средства разрушения. Кроме того, техника неотделима от общества, как неотделима от него потребность в материальных и культурных благах, обеспечиваемых техникой. Что же касается «военной техники», то она существует только на ранней фазе развития человеческого общества, которая сейчас подходит к своему концу. С утверждением коммунизма начнется история развития человеческого общества, не знающая войн и насилия, эксплуатации и принуждения, история, которая ответит «военной технике» место в музеях как свидетельству о тяжелом и мрачном прошлом человеческого общества. Поэтому воен-

ная техника представляет собой особую исторически ограниченную категорию, связанную с техникой и активно влияющую на темпы ее развития, но тем не менее выпадающую из определения понятия «техника».

Общество, нужды которого призвана удовлетворять техника, находится в состоянии постоянного развития от одной ступени к другой. Материальная база этих ступеней развития общества обеспечивается техникой. В свою очередь общество, его организация и структура влияют на технику. Таким образом, всякая совокупность средств труда существует в условиях конкретно-исторического способа производства, характерного для общества на данном этапе его развития.

Способ производства материальных благ, в осуществлении которого техника играет существенную роль как составная часть производительных сил (слагающихся из средств труда и людей, управляющих ими), включает в себя не только производительные силы, но и производственные отношения людей. Производительные силы и производственные отношения находятся в связи, определяемой законом соответствия производственных отношений характеру производительных сил. Производственные отношения определяются состоянием производительных сил, изменяются с их изменением, но, с другой стороны, сами влияют на ускорение или замедление их развития. Поэтому изучать развитие техники как существенного элемента производительных сил нельзя без изучения смены производственных отношений. Однако напоминать об этом в определении техники нет надобности, подобно тому как в определении государства, которых имеется три основных типа, не говорится о существовании того или иного конкретного его типа.

Теперь, понимая, для чего создается техника, как она создается и как она действует, зная влияние условий, в которых она существует и развивается, мы можем дать развернутое определение техники: *техника есть вся совокупность средств труда, создаваемых человеком на основе использования познаваемых им законов природы, для удовлетворения материальных и культурных потребностей общества.*

Энергетическая техника — это область техники, направленная на получение энергии от природных источников, ее целесообразное преобразование, транспортировку и доведение до потребителей.

Для изучения различных областей техники и отдельных технических объектов существуют технические науки. История техники не может не исследовать вещественных форм средств труда, применявшихся на различных ступенях развития человеческого общества, так как без подобного исследования не будет раскрыта присущая технике логика развития, не будут раскрыты проявления сил, движущих это развитие. Изучая конструктивные формы и технологические процессы, история техники проявляет себя в качестве науки технической.

Но история техники направляет острее своего исследования на процесс развития техники, который находится в теснейшей связи с развитием общества. Исследование развития техники без оценки влияния общественных условий невозможно, а оценивая эти условия, история техники проявляет себя в качестве науки общественной.

Таким образом, изучая структуру и свойства техники, история техники носит характер технической науки, а изучая процесс развития техники, она носит характер общественной науки.

Только являясь одновременно наукой технической и общественной, история техники может выполнить свое назначение.

Это назначение состоит в том, чтобы исследовать закономерности развития техники: *история техники — наука, изучающая закономерности развития техники.*

Буржуазная наука не отрицает наличия очевидного технического прогресса — развития техники, перехода ее от низших форм к более высоким. Но буржуазная наука полагает, что причина этого развития, его движущая сила, состоит в идеях, возникающих в умах ученых и изобретателей. Такая точка зрения приводит к признанию случайности в качестве основы технического прогресса, отрицает наличие объективных закономерностей его проявления.

Марксистская история техники, наоборот, в случайных фактах отдельных открытий и изобретений видит форму проявления объективных закономерностей, определяющих пути развития техники.

Отсюда вытекает коренное различие в направленности буржуазной и марксистской историй техники. Для первой исторический факт есть самоцель исследования, предмет исследования, точным описанием которого и ограничивается работа историка. Для второй исторический факт есть только видимый объект исследования, за которым

скрыты объективные закономерности развития, являющиеся предметом исследования. Таким образом, для марксистской истории техники все исторические факты, являющиеся объектом изучения, представляют собой только материал для познания закономерностей развития техники как предмета исследования, точно так же, как, например, объект изучения палеонтологии — остатки ископаемых животных — является материалом для познания предмета этой науки — закономерностей развития органической природы.

Подобно тому как познанные марксистской наукой закономерности общественного развития позволили научно предсказать будущее человеческого общества, марксистская история техники на основе установленных закономерностей развития техники позволяет делать научные прогнозы о дальнейших перспективах технического прогресса.

История техники как наука, исследующая развитие конструктивных форм средств труда и протекающих в них физико-химических процессов, тесно связана с техническими науками. Знание технических наук позволяет всесторонне раскрыть техническое содержание исторического объекта, определить его параметры, эффективность, производительность, коэффициент полезного действия и т. п. и тем самым оценить то новое, что вносило в развитие техники возникновение тех или иных новых технических объектов. Знание технических наук дает возможность проследить ход творческой мысли изобретателей и приоткрыть завесу над тайной творческого метода передовых людей техники.

Как общественная наука, исследующая объективные закономерности развития техники в условиях того или иного способа общественного производства, история техники тесно связана с общественно-экономическими науками. Знание общественно-экономических наук позволяет понять движущие силы и темпы развития техники, раскрыть наличие стимулирующих и тормозящих условий в процессе развития техники.

Техника создается путем использования познанных законов природы. Познание законов природы — предмет естествознания, с которым история техники имеет теснейшую связь.

История техники связана с естествознанием постольку, поскольку технические науки основаны на естествознании, направлены на практическое использование открытых есте-

ствознанием законов объективного мира для производства материальных благ. Развитие естествознания, познание закономерностей природы определяли пути развития техники как метода практического использования открытых закономерностей, а техническая практика, открывая новые явления, ставила перед естествознанием задачи объяснения этих явлений, вызывая зарождение новых отраслей естествознания. Так, например, открытие атмосферного давления направило усилия изобретателей на использование «силы атмосферы», что привело к изобретению парового двигателя. Техническая практика построения и эксплуатации паровых двигателей со своей стороны явилась причиной зарождения термодинамики и ряда других наук.

Таким образом, для изучения истории техники необходимо знать не только современное естествознание, но и путь его исторического развития, необходимо развитие техники исследовать в неразрывной связи с развитием естествознания.

Это позволяет дать оценку каждому открытию и изобретению, ибо, как указывал В. И. Ленин, «Исторические заслуги судятся не тому, чего *не дали* исторические деятели сравнительно с современными требованиями, а по тому, что они *дали нового* сравнительно со своими предшественниками»¹.

Свои научные методы история техники как наука в равной степени и техническая и общественная черпает как из естествознания и технических наук, так и из наук общественных. Из первых история техники заимствует методы эксперимента и его обобщения — математические, графические, графоаналитические и аналитические методы. Из наук общественных история техники заимствует общий для всех наук глубоко научный метод марксистской теории — исторический и диалектический материализм.

К специфическим методам истории техники относится техническая реконструкция — восстановление древних орудий, сооружений, машин по сохранившимся остаткам, свидетельствам, описаниям.

История техники должна уметь находить узловые точки развития техники, ведущие к переходу на новую качественную ступень. Так, например, развитие производства и связанное с ним все более широкое применение водяных колес вызвали кризис гидроэнергетики и переход к теплоэнергетике; увеличение дальности электропередачи вызва-

ло переход к технике трехфазного тока и т. п. Развитие техники, как и всякое развитие, идет за счет внутренних противоречий, раскрытие которых необходимо для понимания особенностей технического прогресса.

Объектами исследования истории техники, из которых она черпает самые разнообразные исторические факты, являются: средства труда разных эпох и народов как в подлинниках, так и воспроизведенные в виде чертежей, фотографий, моделей, описаний; труды деятелей науки и техники; заводская техническая документация; патенты, архивные фонды, представляющие собой источники достоверных документальных сведений, помогающих восстанавливать действительную картину возникновения, развития и отмирания того или иного исторического явления; техническая и научная периодика, содержащая в себе не только описания тех или иных технических объектов, но зачастую характеризующая отношение к ним современников; научная литература по истории техники (так называемая историко-техническая литература). Советская историко-техническая литература быстро развивается, охватывая все большее количество проблем, относящихся к развитию техники. Буржуазная историко-техническая литература весьма обширна и содержит большой и ценный фактический материал. Однако эта литература требует критического подхода, так как оценка фактического материала буржуазными историками техники в большинстве своем идеологически порочна и направлена на идеализацию капитализма.

1-2. ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ

Характер общей
тенденции
количественного
роста техники

Изучение большого числа исторических фактов показывает, что техника находится в состоянии постоянного и непрерывного количественного изменения. Изменяются как количество машин, судов, локомотивов и других технических объектов, так и их качество: они становятся более мощными, производительными, эффективными. Периодически происходит замена устаревших технических объектов другими, новыми.

Возникает вопрос: являются ли происходящие изменения случайными или же они служат внешним проявлением закономерного развития? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо за совокупностью разнообразных фактов изме-

¹ В. И. Ленин, Соч., Изд. 4-е, т. 2, стр. 166.

нений увидеть общие свойства, присущие каждому из них. Таким общим свойством любых исторических явлений служит их координация во времени. Техника изменяется во времени, а всякому изменению во времени свойственна такая его характеристика, как скорость. Изучение скорости изменения техники может раскрыть, является ли оно закономерным, подобно тому как изучение скорости падения тел в пустоте раскрывает наличие объективного закона тяготения.

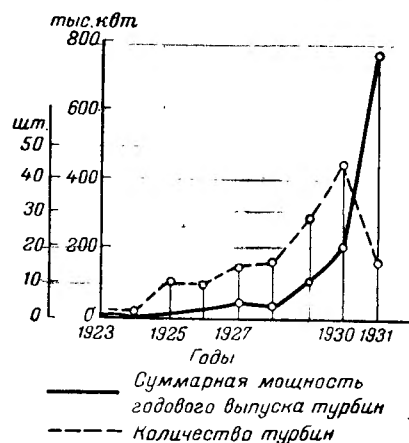


Рис. 1-1. Рост установленной мощности паровых турбин и их числа в СССР.

(и их доли), граммы (и их доли), кубические метры (и их доли).

Какой же измеритель можно принять для скорости изменения такого сложного объекта, каким является техника? Для этого прежде всего следует установить, какие из многочисленных изменений техники могут быть приняты за определяющие.

Рассмотрим конкретный случай изменений, характерных для советского турбостроения в период 1923—1931 гг. (рис. 1-1).

Две кривые — установленной мощности (в тыс. кВт) и числа турбин (шт.) — отражают фактический ход событий, но по-разному. Подойдем к оценке этих кривых с позиций основного назначения техники как средства создания материальных условий жизни общества. Соответствует ли рост установленной мощности (и пропорциональной ей выработки электроэнергии) увеличению количества мате-

риальных благ? Да, соответствует. Чем больше мощности, тем больше энергии, тем больше можно выработать материальных благ. Сохраняется ли такое же соответствие между материальными благами и количеством установленных турбин? Нет, не сохраняется, так как количество установленных турбин непропорционально количеству вырабатываемых киловатт-часов, что отчетливо видно на периоде 1930—1931 гг., когда выработка энергии растет, а количество установленных турбин падает.

Первая кривая носит абсолютный характер, пропорциональна абсолютному количеству материальных благ, произведенных на выработанной энергии. Эта характеристика имеет явно выраженную тенденцию роста, находящуюся в связи с законом расширенного воспроизводства.

Вторая кривая имеет относительный характер, представляя собой отношение установленной мощности к усредненной мощности одной турбины. А единичная мощность турбины является существенной характеристикой качественного уровня техники турбостроения, начавшей свое развитие с турбин мощностью 1—5 кВт и достигнувшей единичной мощности 400 000 кВт.

Используя подобные конкретные материалы, мы имеем возможность исследовать процесс изменения основных количественных и качественных показателей техники путем использования конкретных величин, доступных измерению при помощи определенных измерителей (киловатты и штуки в рассмотренном примере).

Рассмотрим другой случай, связанный с заменой устаревших технических объектов новыми (рис. 1-2).

Парусные суда выражают одно качество флота, паровые — другое. Однако количественная сторона может быть выражена одним общим измерителем — числом регистровых брутто-тонн.

Очевидно, что количественный рост флота выражен здесь суммарной кривой, пропорциональной количеству производимых и транспортируемых при помощи техники материальных благ. Здесь мы можем установить, что для измерения морского транспорта также характерна тенденция роста, достигаемая на разных исторических этапах разными техническими средствами, использующими разные явления природы (ветер и теплота — в рассмотренном случае).

Очень отчетливо исторический процесс своеобразной эстафеты технических приемов получения железа выявлен

в исследовании, проведенном в Польской Народной Республике проф. М. Радваном. Построенные им на логарифмической диаграмме (рис. 1-3) кривые показывают переходы от кричных печей к домнам, работающим на древесном угле, а затем и к современным.

Взаимосвязь между количественными показателями изменения техники и производимыми при ее помощи материальными благами носит очень сложный характер. Так, в приведенных примерах количество выработанных кило-

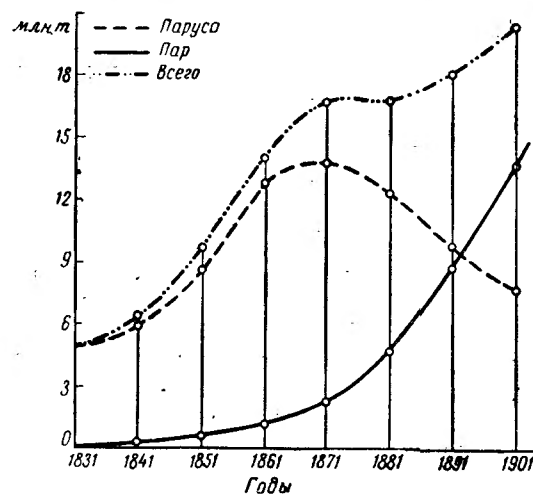


Рис. 1-2. Рост тоннажа мирового морского транспорта.

ватт-часов зависит не только от числа установленных киловатт, но и от степени использования машин, а количество перевезенных грузов зависит не только от наличного количества регистровых брутто-тонн флота, но и от эксплуатационной скорости движения судов. В наибольшей степени на связь между техникой и производимыми при ее помощи продуктами влияют общественные законы, о чем подробно будет сказано ниже.

Вместе с тем количественные показатели являются орудием, способным установить, что за кажущимся внешним хаосом многообразных изменений имеются некоторые закономерные тенденции развития техники. На основе этих тенденций можно говорить прежде всего о характере количественного развития отдельных отраслей техники:

о скорости роста угледобычи, выплавки стали, протяженности железных дорог, выработке электроэнергии и т. д.

Рассмотрим количественное развитие некоторых совершенно различных по своему объему отраслей техники (рис. 1-3—1-6). Здесь (ср. с рис. 1-1 и 1-2) взяты три из многих кривых, отличающихся плавным изменением кривизны, характерным, как это будет видно дальше, и для бо-

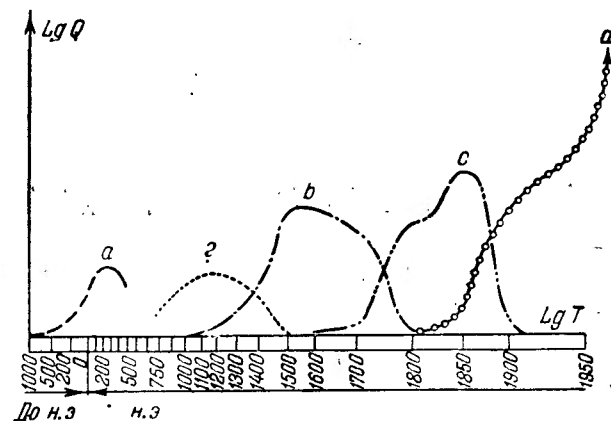


Рис. 1-3. Динамика выплавки железа на территории Польской Народной Республики.

a — древние сыродутные печи; *?* — предположительная кривая вследствие недостатка фактических данных; *b* — средневековые «домницы»; *c* — доменные печи на древесном угле; *d* — доменные печи на коксе; *Q* — количество выплавленного металла.

лее крупных областей техники в целом как всей совокупности средств труда. На представленных кривых, относящихся к разным по объему и свойствам областям техники, можно усмотреть нечто общее. Это общее состоит в росте рассматриваемых областей техники, в характере этого роста. На всех трех примерах (а их, как было сказано, можно привести тысячи) виден *ускоренный рост*.

Ускоренный рост виден и на кривой (рис. 1-7), показывающей количественную характеристику изменений техники, взятой в целом для всего мира. В данном случае для оценки изменения техники в целом в качестве показателя принят прирост объема мировой промышленной продукции в процентах.

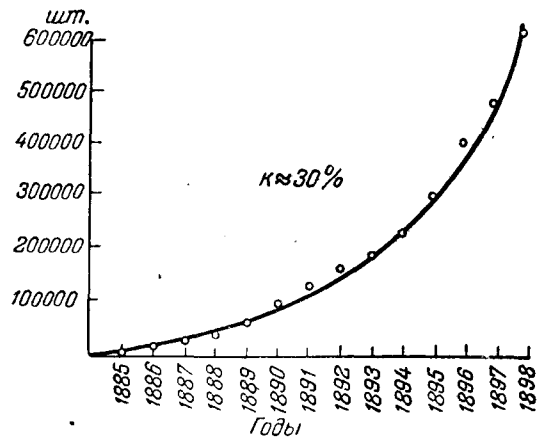


Рис. 1-4. Рост количества установленных ламп накаливания в Германии с 1885 по 1898 г.

На рис 1-7 видно, что, за исключением периода, когда мирное развитие было нарушено войной 1914—1918 гг., отчетливо проявляется та же тенденция ускоренного роста. А ускоренный рост выпуска промышленной продукции невозможен без ускоренного роста техники. Ниже будет показана более тесная связь между изменениями техники как совокупности средства труда и изменениями

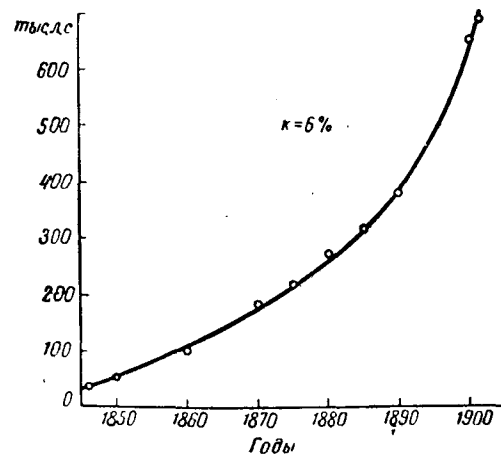


Рис. 1-5. Рост установленной мощности паровых машин в Бельгии за 1845—1901 гг.

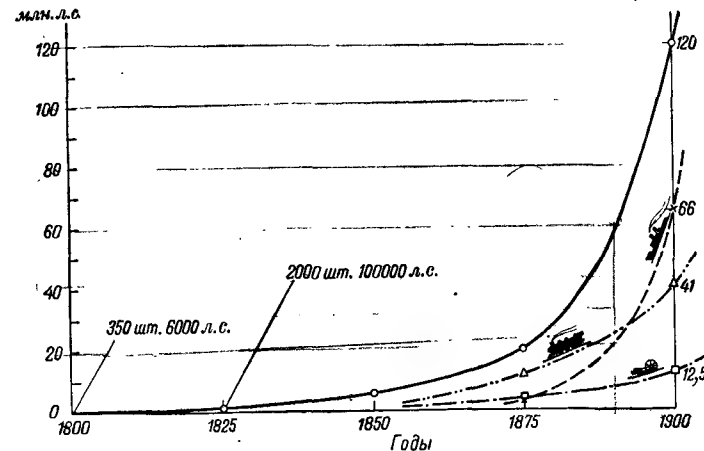


Рис. 1-6. Рост мировой установленной мощности паровых машин в XIX в. (стационарных, судовых, паровозных).

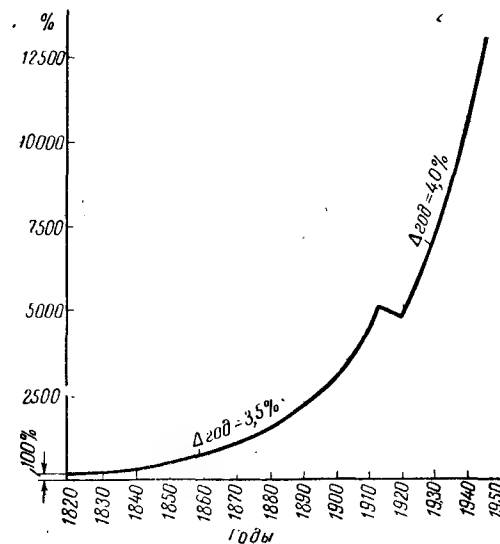


Рис. 1-7. Развитие мирового промышленного производства.

объема промышленной продукции, вырабатываемой путем использования техники. А сейчас мы вправе, исходя из рассмотренных фактов, сделать вывод, что изменения, происходящие в технике, не случайны, что совокупность этих изменений показывает наличие развития техники, причем это развитие имеет присущую ему тенденцию ускоренного роста.

Рассмотренные кривые показали, что для техники, создаваемой человеком на основе познания законов природы или, иными словами, на основе развития науки, остается справедливым определение Энгельса, который писал, что «...наука движется вперед пропорционально массе знаний, унаследованных ею от предшествующего поколения, следовательно, при самых обыкновенных условиях она также растёт в геометрической прогрессии»¹.

Приведенные на рис. 1-4 — 1-6 кривые развития относятся также к «самым обыкновенным условиям», характерным для периода относительно равномерного развития капитализма до перехода его в последнюю стадию — империализм. Здесь тенденция ускоренного развития по геометрической прогрессии отчетливо выражена в фактическом историческом материале. На рис. 1-7 уже заметно влияние отхода от «обыкновенных условий», вызванного войной, приостановившей плавное развитие.

Итак, количественное развитие техники, выражаемое в абсолютных количественных показателях, имеет тенденцию постоянного роста по геометрической прогрессии. Как известно из математики, геометрическая прогрессия описывается уравнением

$$C_n = C_1 q^{n-1},$$

где C_1 — первое число ряда;

C_n — n -е число ряда;

n — число членов в ряду;

q — знаменатель прогрессии, равный $1 + \frac{K}{100}$.

K представляет собой не что иное, как выраженное в процентах изменение, отнесенное к единице геометрического ряда от 1 до n .

Принимая для изменений по времени за единицу 1 год, получим в качестве значения K процент ежегодного изменения или годовой прирост исследуемой величины в про-

центах, равный: на рис. 1-4—30%, на рис. 1-5—6%, на рис. 1-6—7 и 9% для разных периодов развития, а на рис. 1-7—3,5 и 4%.

Показатели количественных изменений в виде ежегодного процента широко применяются для оценки темпов развития отдельных отраслей техники в зависимости от тех или иных условий. Например, на майском Пленуме ЦК КПСС 1958 г. были приведены данные ежегодного прироста в процентах в СССР и США по ряду областей промышленного производства, в том числе:

	СССР	США
Электроэнергия	11,6%	8,6%
Нефть	16,8%	2,7%
Сталь	7,6%	0,2%

Очевидно, что приведенные цифры отражают темпы роста таких отраслей техники, как энергетика, нефтедобыча, сталеварение.

Зависимость техники от законов природы и от общественных экономических законов

Исследование количественных показателей развития техники дает возможность наглядно и достаточно точно проследить влияние на нее законов природы и общественных экономических законов.

В определении техники было указано, что техника создается человеком на основе познания законов природы. Она служит главным образом для производства материальных благ. Протекание процесса производства подчиняется законам природы, но может быть направляемо (и в действительности направляется) в желаемую сторону человеком, познавшим эти законы. Для того чтобы целесообразно осуществить тот или иной процесс, нужна соответствующая конструктивная форма технического объекта. Здесь слова «конструктивная форма» в отличие от формы геометрической предусматривают и содержание, заключенное в рамки геометрической формы. Так, например, совершенно одинаковые по своей геометрической форме закаленная и незакаленная стальные пружины будут отличаться по своей конструктивной форме. А поскольку процесс определяется законами природы, то и сама конструктивная форма технических объектов диктуется законами природы.

Так, например, зная законы отражения света, можно найти конструктивную форму отражателя для пучка лучей желаемого вида. Зная законы относительного механического движения, можно найти правильную конструктивную

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс, Соч., т. 1, стр. 568, изд. 2-е, 1955.

форму входной кромки лопатки паровой, газовой или гидравлической турбины, обеспечивающую безударный вход на лопатку пара, газа или воды.

Поскольку конструктивные формы технических объектов определяются законами природы, *техника безразлична к классам и нациям*. Отсюда тождественность конструктивных форм, изыскиваемых техниками разных стран, различных общественных формаций при использовании ими одних и тех же законов природы. Поэтому, например, основные конструктивные черты паровых турбин Ленинградского металлического завода (ЛМЗ) не отличаются от основных конструктивных черт турбин Джeneral Электрик (США) или Метрополитен Виккерс (Англия).

Хотя конструктивные формы технических объектов определяются использованием познанных законов природы, общественные законы могут влиять на конструктивные формы. Так, например, стремление к облегчению труда и его безопасности, характерное для развития техники социалистических стран, накладывает свой отпечаток на конструктивные формы машин. Следует также отметить, что общественный строй социалистических стран способствует развитию более интенсивных научных исследований, познанию новых законов природы и использованию их в интересах народа.

Если конструктивные формы техники определяются законами природы, то *темпы ее развития, его характер и направление определяются общественными законами*. Темпы развития выражаются величиной процента ежегодного прироста промышленной продукции. Характер развития может быть плавным, как это имеет место в социалистических странах с плановым развитием, или беспорядочным, как это имеет место в капиталистических странах в условиях постоянных смен подъемов и спадов. Направление развития либо имеет целью удовлетворение растущих потребностей общества, как это имеет место в социалистических странах, либо — обогащение кучки капиталистов, как это имеет место в капиталистических странах.

Фактические темпы развития производства отдельных продуктов или полупродуктов, как, например, чугуна, стали, электроэнергии и т. п., позволяют отчетливо судить об определяющем влиянии общественных законов на темпы развития техники.

На рис. 1-8 показано развитие добычи каменного угля в Англии за длительный период, охватывающий 150 лет

(1800—1950 гг.). В начальный период развития машинной техники и становления капитализма заметно влияние новой техники на рост добычи угля: применение паровых машин для вентиляции шахт (1), введение взрывобезопасных шахтерских ламп Дэви и начало локомотивостроения (2), строительство железных дорог (3). С середины XIX в. темпы развития становятся достаточно стабильными с показателем прогрессии $K=3\%$.

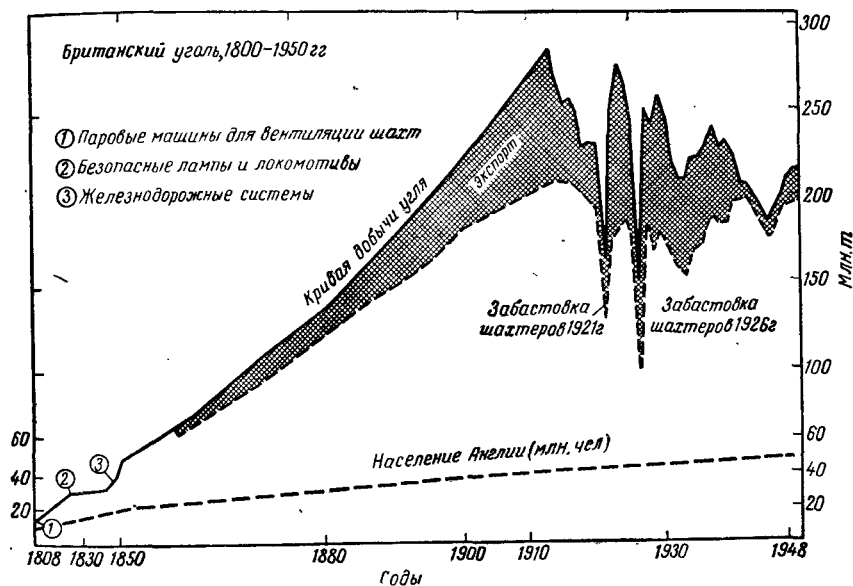


Рис. 1-8. Рост добычи каменного угля и рост населения Англии с 1800 по 1950 г.

С началом войны 1914—1918 гг. резко падает экспорт, забастовки шахтеров в 1921 и 1926 гг. снижают добычу до объема второй половины XIX в., а затем наступает полоса постоянной депрессии, в результате которой добыча угля в Англии в 1950 г. не достигает уровня 1900 г.

Приведенный пример является одним из многих, показывающий, как переход капитализма в его последнюю фазу — империализм — начинает тормозить развитие производительных сил общества.

Вместе с замедлением темпа угледобычи замедлился и темп развития техники шахтного дела, внедрения прогрессивных высокопроизводительных машин, механизации. Об-

ественные условия затормозили возможности использования законов природы и оказались определяющим фактором развития техники.

Одна из самых общих характеристик темпов развития производительных сил и техники в виде изменения общего объема промышленной продукции США представлена на рис. 1-9.



Рис. 1-9. Рост суммарного объема промышленного производства в США за период 1863—1937 гг. („Структура американской экономики“, ч. 1, Комитет национальных ресурсов).

В данном случае тенденция развития за полувековой период (с 1879 по 1929 г.) выражена геометрической прогрессией с показателем $K=3,5\%$ годового прироста. Реальные условия капиталистического способа производства — кризисы, спады, «бумы» — отображены на кривой развития рядом зигзагов, увеличивающихся по своей величине по мере приближения к современности. Кризисы 1921 и особенно 1929 гг. нарушили державшиеся столетия темпы с $K=3,5\%$.

По данным Научно-исследовательского экономического института Госплана СССР дальнейшие темпы роста объема промышленной продукции в США составляли:

в период 1930—1940 гг.—1,2%;

в период 1946—1953 гг.—5,8%;

в период 1953—1959 гг.—1,8%;

а за весь период 1918—1958 гг.—всего 2,9%.

Рис. 1-9 заслуживает пристального рассмотрения. Прежде всего на нем обращает на себя внимание постоянство значения ежегодного прироста промышленной продукции 3,5% за период с 1863 по 1919 г. За этот период производительные силы страны существенно изменились.

Увеличилось число промышленных рабочих, изменилось само качество техники. В 1863 г. техника США знала тихие и малоэкономичные паровые машины, работавшие паром низкого давления и температуры, немногие железнодорожные линии, небольшое количество пароходов, швейную машину с ручным и ножным приводом и т. п. В 1929 г. США располагали современной техникой с крупными электростанциями, развитой электрификацией промышленности, с миллионами автомобилей, множеством заводов и фабрик, работающих по принципу массового производства. И, несмотря на громадное изменение производительных сил, процент ежегодного прироста промышленной продукции оставался неизменным. Это значит, что прирост производительных сил — техники и рабочих — шел полностью на то, чтобы осуществлять процесс их развития по геометрической прогрессии с постоянным показателем K .

Техника менялась. Число рабочих менялось. Производительность труда также, очевидно, менялась. Постоянными за рассмотренный период оставались производственные отношения между людьми — капиталистические производственные отношения.

В дальнейшем будет показано, что в условиях действия других общественных законов, например социалистических, темпы развития техники будут другими. А сейчас обратим внимание на тот факт, что за более короткий период с 1929 г. по наше время постоянство процента прироста нарушилось и, несмотря на то, что качество техники стало выше, этот процент упал. Здесь проявилось действие общественных законов, связанное с переходом капитализма в фазу империализма. Спад темпов развития, резко отразившийся на экономике европейских стран еще в период войны 1914—1918 гг., в 1929 г. со всей силой проявился и в США.

Ученые и техники познали и могут применить новые законы природы, имеются все материальные возможности достижения более высоких темпов развития, но мешает капитализм, как писал В. И. Ленин, а в период империализма его помехи становятся особо ощутимыми (рис. 1-10).

Выделяя из общей картины энергетику, можно видеть, что и она развивалась в США крайне неравномерно (рис. 1-11) и за 20 лет с 1930 по 1950 г. ни разу не достигала показателя 1929 г. по вводу мощности.

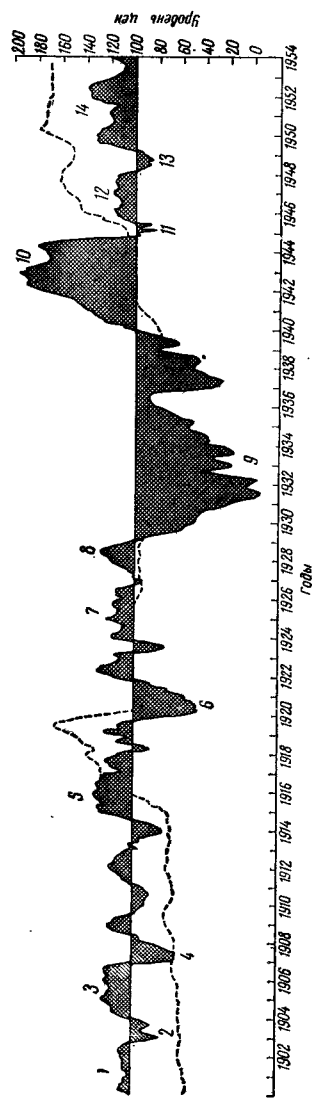


Рис. 1-10. Периоды процветания и депрессий в США.

1 — торговое процветание; 2 — паника богатых людей; 3 — процветание промышленных корпораций; 4 — паника 1907 г.; 5 — первая мировая война; 6 — первая послепослевоенная депрессия; 7 — новая эра процветания; 8 — бум игры на повышение; 9 — вторая послепослевоенная депрессия; 10 — вторая мировая война; 11 — реконструкция промышленности; 12 — послепослевоенный бум; 13 — снижение 1949 г.; 14 — война в Корее. (Из книги «Вильдинг Ситизеншип», изданной в Бостоне в 1936 г.)

Если рассмотреть количественные показатели развития и по другим отраслям промышленности, то станет ясным влияние общественных условий и на направление характера использования техники. При достаточно высоком ежегодном приросте выпуска различных видов вооружения выпуск товаров широкого потребления в ряде областей остался на прежнем уровне или даже уменьшился.

Выше приводилась величина годового прироста выработки электроэнергии в США, равная 8,6%. Это наивысший процент годового прироста по сравнению со всеми другими отраслями техники, так как электроэнергия в очень большом количестве потребляется в производстве вооружения. Иначе обстоит дело с ростом товаров народного потребления. Прирост производства шерстяных тканей, например, в СССР составляет 7,8%, а в США уменьшился до 3,7%.

Совершенно иная картина количественного развития производительных сил общества и их техники наблюдается в СССР и странах социалистического лагеря.

На рис. 1-12 показаны темпы прироста общего

объема промышленной продукции СССР за период 1913—1955 гг. Резкое нарушение основной тенденции развития наблюдается в период Великой Отечественной войны и ликвидации ее последствий. В мирное время темпы развития в несколько раз превосходят темпы развития капиталистических стран, составляя для отдельных участков, приведенных на рис. 1-12, величину K свыше 15%. Даже в 1918—1929 гг., когда наша страна была технически отсталой по сравнению со многими зарубежными государствами, темпы прироста промышленной продукции СССР были вдвое выше темпов капиталистических стран. Следовательно, дело не

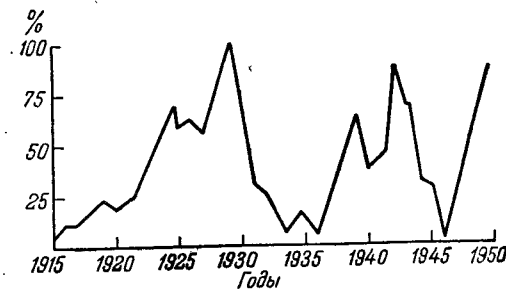


Рис. 1-11. Ввод энергетической мощности электростанций в США.

только в количестве машин, станков, орудий, электроэнергии и т. п., но и в способах их использования. Плановое хозяйство, отсутствие анархии и капиталистического хищничества, бережливое использование ресурсов страны, отсутствие безработицы, характерные для условий капиталистического общества, определяют новые, гораздо более высокие темпы развития производительных сил общества и техники.

Обращаясь к темпам развития других социалистических стран, возникших в период после второй мировой войны, видим, что и для них ежегодный прирост промышленной продукции составляет около 10% как для индустриальных (Чехословакия), так и для аграрных (Албания) стран.

Рассмотренный фактический материал позволяет сделать следующие выводы: развитие техники как элемента производительных сил имеет тенденцию ускоренного роста, приближенно характеризуемого геометрической прогрессией, причем числовое значение показателя прогрессии, выражающего темпы количественного развития техники,

определяется в основном общественными условиями производства.

В приведенном определении словами «развитие техники имеет тенденцию ускоренного роста, приближенно характеризующегося геометрической прогрессией» отражается двойственность проявления движущей силы техники. Открытие новых законов природы наукой, развивающейся по

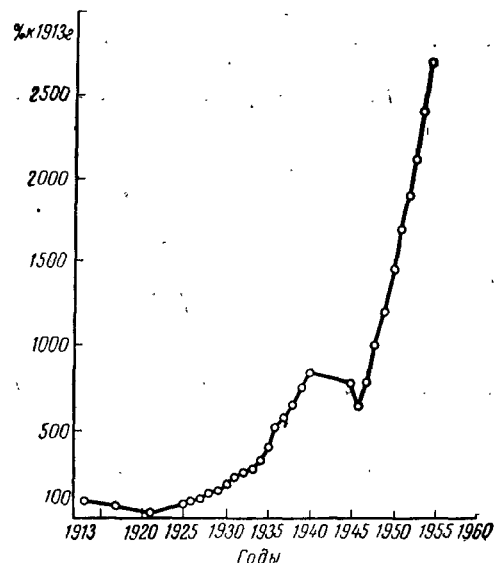


Рис. 1-12. Рост физического объема валовой продукции промышленности СССР за 1913—1955 гг. (% к 1913 г.). За 12 лет (1918—1929) + 6,9; за 11 лет (1930—1940) + 16,5; за 5 лет (1941—1945) — 1,7; за 11 лет (1947—1957) + 15,9; за 40 лет (1918—1957) + 10,1.

геометрической прогрессии, рост народонаселения и его потребностей вызывают тенденцию развития техники по закону геометрической прогрессии. Но эта тенденция нарушается влиянием общественных законов, приходящих в противоречие с производительными силами общества на известном историческом этапе их развития.

Наглядным примером проявления сил, нарушающих тенденцию развития, может служить состояние энергетики мира за последние 100 лет, начиная с 1860 г. до наших дней (рис. 1-13). С 1860 по 1914 г. кривая идет плавно, и можно полагать, что для капиталистического мира харак-

терен ежегодный прирост энергетики порядка 4,5%. Война 1914—1918 гг. резко снизила темпы развития энергетики. Послевоенный рост был замедлен, а кризис 1929—1933 гг. отбросил энергетику к уровню 1912 г. Заметный подъем после кризисного состояния был недолг; война 1939—1945 гг. приостановила рост энергетики. Сейчас значительный рост обуславливается высокими темпами развития энергетики в СССР (12%) и США (8% — в связи с большими вложениями в производство вооружения).

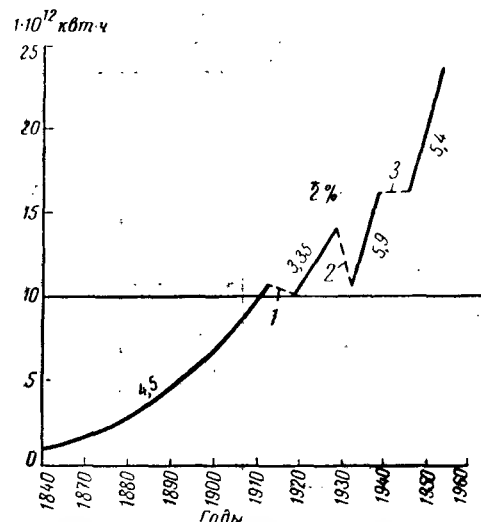


Рис. 1-13. Развитие мировой энергетики с 1860 г.

1 — война 1914—1919 гг.; 2 — мировой экономический кризис 1929—1933 гг.; 3 — война 1939—1945 гг.

На темпы развития техники влияет также и развитие естествознания, познание законов природы, но это влияние не является определяющим. Так, например, изучение и последующее использование электрических явлений вызвали ускорение роста общественного производства и его техники. Это привело к кризису капиталистического способа производства, но не сказалось на ежегодном приросте; так как это влияние на темпы есть закономерное проявление ускоренного развития при постоянном K . Наука, как писал Энгельс, развивается по закону геометрической прогрессии; вместе с ней по тому же закону развивается техника, пока не наступает тормозящее действие общественных законов,

революционный переход к новым общественным законам и соответствующему им новому, более высокому значению K .

Движущая сила развития техники

Техника предназначена для удовлетворения материальных и культурных потребностей общества. Количественный рост техники, очевидно, вызывается количественным ростом этих потребностей. Рост потребностей связан прежде всего с ростом народонаселения, которое также возрастает по закону, близкому к геометрической прогрессии, как на это указывал Энгельс. Но показатель прогрессии роста народонаселения значительно ниже показателей

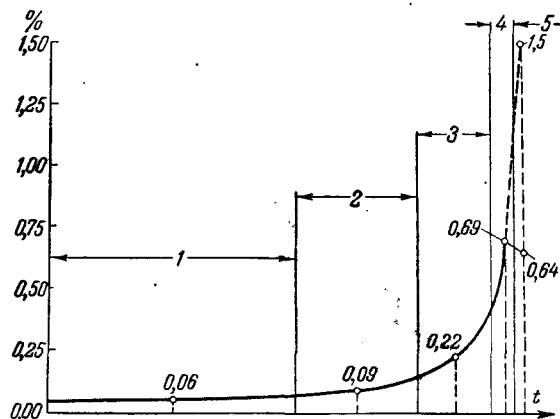


Рис. 1-14. Изменение величины среднего процента ежегодного прироста народонаселения (по опыту исчисления роста населения в Европе).

1 — период варварства; 2 — феодальный период; 3 — период первоначального накопления; 4 — период промышленного капитализма; 5 — социализм и империализм.

роста промышленной продукции и техники, предназначенной для ее производства. На рис. 1-8, например, видно, что увеличение народонаселения Англии (пунктирная линия внизу графика) в значительной степени отстает от линии добычи угля, одного из основных показателей развития техники в течение рассматриваемого периода. Действительно, усредненная кривая роста народонаселения Европы (рис. 1-14) дает следующие средние значения величины ежегодного прироста: для периода первобытных общин — 0,06%, для феодального периода — 0,9%, для периода первоначального накопления — 0,22%, для периода капитализ-

ма — 0,69% и для современного мира, разделенного на два лагеря, — 0,64% для капиталистических стран и 1,5% для СССР.

Если нанести на одну диаграмму рост объема промышленного производства Π_a и народонаселения L (рис. 1-15), то можно видеть, что вследствие неодинаковой скорости роста величин Π_a и L их отношение $\frac{\Pi_a}{L}$ является переменным, постоянно возрастающим по своей величине. Но это отношение является не чем иным, как количеством про-

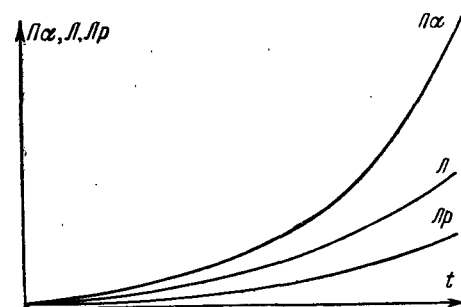


Рис. 1-15. Сопоставление роста объема промышленной продукции Π_a с ростом народонаселения L и его работоспособной части L_p , показывающее историческую тенденцию возрастания потребления на душу населения $\frac{\Pi_a}{L}$ и средней

производительности труда $\frac{\Pi_a}{L_p}$.

дукции промышленного производства, приходящимся в среднем на одного члена общества, т. е. *душевым потреблением*.

Таким образом, основная движущая сила развития техники — потребность общества в материальных и культурных благах — предъявляет к технике все большие требования. Техника, создавая возможность удовлетворить одни требования, сама вызывает новые и новые. Производя при помощи техники мотоциклы и автомашины, радиоприемники и телевизоры, фотоаппараты и электроприборы, холодильники и пылесосы и многое, многое другое, общество вызывает постоянный рост потребности своих членов в продукции промышленного производства. Этому росту нет

предела. Но проявляется этот рост по-разному в условиях различных общественных отношений. Ничто не тормозит роста потребностей в условиях социалистического общества. Иначе обстоит дело в капиталистических странах.

Совершенно ложны и неубедительны попытки ряда буржуазных экономистов выдавать снижение темпов промышленного производства в капиталистических странах за признак наступающего снижения потребностей как следствия «насыщения» членов общества всем потребным для жизни в то время как миллионы безработных и полубезработных лишены самого необходимого.

Но если историческая тенденция показывает рост душевого потребления, то возможность удовлетворения этого роста заключается в том, чтобы каждый работоспособный член общества мог производить все больше промышленной продукции.

Это имеет место в действительности. Если на рис. 1 под линией L провести линию L_p , показывающую рост работоспособной части населения, то отношение

$$\frac{L_a}{L_p}$$

также будет переменным, постоянно возрастающим.

Но это отношение есть не что иное, как усредненная по всему производству данного общества *производительность труда*, фактор исключительного значения, о котором В. И. Ленин писал: «Производительность труда, это, в последнем счете, самое важное, самое главное для победы нового общественного строя».¹

От чего зависит величина производительности труда? Чем определяется количество продукта, приходящегося в единицу времени на одного рабочего? Двумя факторами: интенсивностью труда и техникой². Возможности повышения производительности труда за счет его интенсивности ограничены: даже при изнуряющей интенсивности труда человек может не более как вдвое, втрое увеличить его производительность. Возможности же техники буквально безграничны.

¹ В. И. Ленин. Соч., изд. 4-е, т. 29, стр. 394.

² Имеется в виду, что организация труда, имеющая большое значение в его производительности, учитывается вместе с техникой, поскольку сами организационные формы прежде всего определяются используемой техникой.

Орудия и машины
как средства
увеличения
производительности
труда

Повышение производительности труда достигается путем применения орудий и машин. Орудие возникло как искусственное «продолжение» естественных органов человека: рук, зубов,

пальцев. Здесь «продолжение» означает не только простое удлинение, как, например, использование палки, но всестороннее умножение свойств естественных органов. Так, нож режет лучше ногтя, клещи «кусают» сильнее зубов, молот бьет сильнее, чем кулак, и т. д.

Но орудие в состоянии выполнять только единичную узкую функцию: резать, дробить, распиливать, тогда как трудовая производственная деятельность человека значительно шире и включает в себя ряд достаточно широких функций. Простейшая из этих функций — *транспортная* — состоит в перемещении твердых, жидких и газообразных тел в пространстве. Вторая, более сложная функция человека-работника — *технологическая* функция, назначение которой заключается в изменении предмета труда. Это изменение формы или свойств предмета труда (резанием, дроблением, ковкой, прокаткой, закалкой, отжигом и т. п.) производится при помощи самых разнообразных средств и прежде всего при помощи орудий. Перемещения или изменения, лежащие в основе транспортной и технологической функций труда, могут быть осуществлены только при затрате энергии. Поэтому человек, работая вручную, одновременно выполняет и *энергетическую* функцию, являясь живым двигателем при различных устройствах.

При выполнении перечисленных трех функций в организме рабочего осуществляется сложная система связи, при которой орган, воспринимающий внешний раздражитель, посылает по чувствительным нервам в центральную нервную систему информационные импульсы возбуждения, а центральная нервная система через двигательные нервы к органам — управляющие импульсы.

Контрольно-управляющая функция проявляется как форма связи объективного процесса труда с логическим аппаратом работника. Сам же логический аппарат выполняет особую ему присущую *логическую* функцию, которая отличается от четырех предыдущих не связана во времени с процессом труда и может в значительной степени протекать как до его начала, когда обдумывается предстоящий труд, так и в процессе его, когда предвидятся его результаты, так и

после его окончания, когда эти результаты анализируют как критерий правильности задуманного процесса.

Выделение из сложного процесса труда пяти основных функций: *транспортной, технологической, энергетической, контрольно-управляющей и логической* дает возможность понять назначение машин, состоящее в частичной или полной замене работника при выполнении ими той или иной из перечисленных трудовых функций.

Так, транспортные машины — локомотив, автомобиль, кран, лифт и т. п. — заменили человека в выполнении транспортных функций. Технологические машины, станки самого разнообразного назначения взяли из рук рабочего орудие (резец, пилу, нож и т. п.), многократно увеличили его и, кроме того, сделали возможным работу многими орудиями одновременно. В отдельных случаях, когда ручной труд выполнялся лишь с помощью рук, технологические машины заменили искусные руки рабочего, его пальцы, как это имело место в ткацких прядильных машинах. Энергетические машины вместо человека привели в движение разнообразные транспортные и технологические машины. Автоматические устройства приняли на себя выполнение контрольно-управляющих функций человека в управлении работой транспортных (например, автоблокировка), энергетических (например, автоматическое регулирование числа оборотов турбины) и технологических машин (например, станки-автоматы, целые автоматические линии и заводы).

В настоящее время быстро развиваются машины, которым поручается заменять человека в выполнении ряда формально-логических функций: запоминание, систематизация, отбор, решение сложных математических уравнений. Современные счетно-решающие, кибернетические машины все шире применяются не только для осуществления контроля и управления, но и для решения самостоятельных задач.

Таким образом, классификация машин по их назначению может быть представлена в виде таблицы на стр. 35.

Взаимосвязь между отдельными видами машин представлена на рис. 1-16. В целях упрощения схемы не показаны линии обратной связи управляемых объектов, а также энергоснабжение контрольно-управляющих и логических машин в силу его незначительности и отсутствия эквивалента между расходом энергии и полезной отдачей управляющих и логических машин.

№	Функция	Назначение	Машина
1	Транспортная	Перемещение	Транспортная машина: а) более подвижная (локомотив); б) менее подвижная (лифт, кран)
2	Технологическая	Изменение (формы, свойств) предмета труда	Технологическая машина: а) с частичной заменой работника; б) с полной заменой работника
3	Энергетическая	Преобразование или трансформация энергии	Энергетическая машина: генератор или двигатель а) первичный; б) вторичный
4	Контрольно-управляющая	Управление и контроль за работой транспортных, технологических и энергетических машин	Системы автоматического контроля и управления
5	Логическая	Выполнение формальных логических функций	Счетно-решающие машины, кибернетические машины

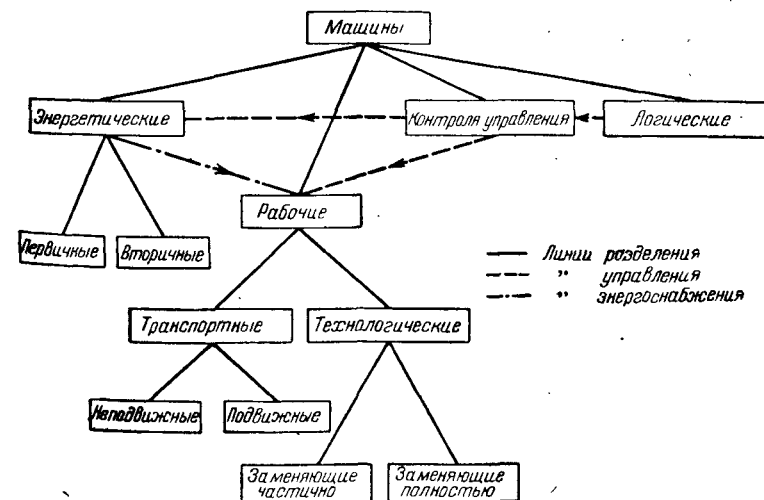


Рис. 1-16. Схема классификации машин и связей между ними.

Машина дает возможность повышать производительность труда, т. е. количество продукта, отнесенного к одному рабочему и единице времени, во много раз больше, чем этого можно достигнуть за счет интенсификации труда. Поэтому затрата энергии рабочего на единицу продукции при той же интенсивности труда всегда меньше при применении машины. Следовательно, машина облегчает труд человека. Капиталист в погоне за максимальной прибылью применяет и машины и интенсификацию труда, которую при использовании машины можно довести до изнурительных пределов. Отсюда создается впечатление, что в капиталистических условиях машина не облегчает труда человека. Однако дело не в машине, а в том, как ее использовать. Эксплуатирует не машина, а человек. Одна и та же машина в капиталистических и социалистических условиях может либо уменьшить, либо увеличить затрату энергии рабочим в течение равновеликого рабочего дня. Но и в том, и в другом случаях машина уменьшает затрату энергии рабочего на единицу продукции.

В развитии технологических машин, непосредственно воздействующих на обрабатываемый предмет и осуществляющих его изменение, можно выделить три направления, которые служат основой их классификации:

1-й класс технологических машин возник в процессе количественного роста ручных орудий. Так, ручной молот сначала «вырос» в так называемый «хвостовой», приводившийся в движение от водяного колеса, а затем и в более сложные формы паровых и пневматических молотов, оставаясь молотом по принципу своего действия (рис. 1-17). Из ручных орудий «выросли» также ножницы, пест со ступой, мельничный жернов, рычажный пресс (клещи) и ряд других.

2-й наиболее распространенный класс технологических машин возник путем передачи машине орудия из рук рабочего. К числу этих машин относятся: лесопильная рама (передана пила), станок для насечки напильников (переданы зубило и молоток), все металлообрабатывающие станки (переданы: зубило, крейцмейсель, долото, резец, напильник и т. п.).

3-й класс технологических машин возник в процессе замены ручного труда, выполнявшегося непосредственно руками и пальцами рук, этими «естественными орудиями» человека, работой машины. К такому труду относятся: плетение, прядение, ткачество, где в помощь пальцам и рукам

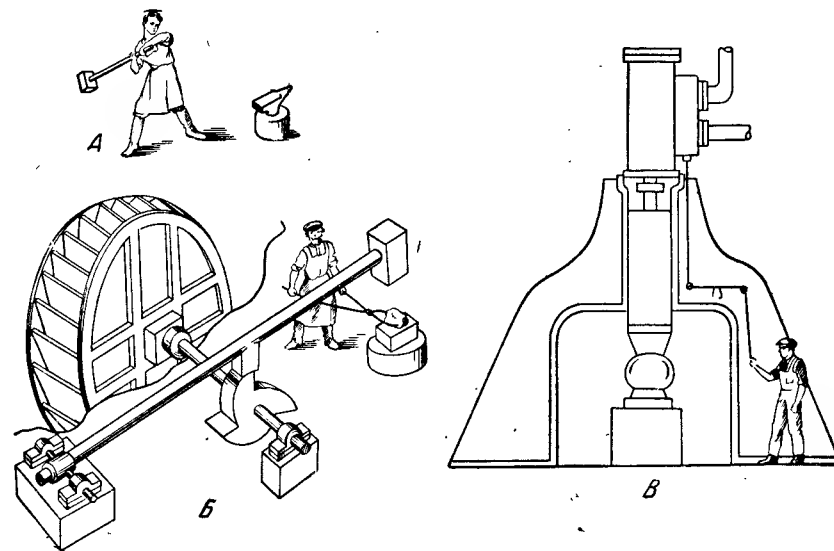


Рис. 1-17. Три этапа развития молота.

А — ручной молот; Б — молот-машина, сохраняющая старые конструктивные формы; В — молот-машина, отошедшая от старых конструктивных форм.

применялись веретена, бердо и другие приспособления, впоследствии «выросшие» в машины.

Итак, в отличие от орудия, удлиняющего естественные органы человека, машина частично или полностью заменяет его в выполнении тех или иных трудовых функций с целью увеличения производительности труда и его облегчения. Отсюда можно дать определение машины: *машина есть совокупность материальных средств, создаваемая человеком для использования явлений и процессов природы с целью облегчения труда и увеличения его производительности путем частичной или полной замены тех или иных трудовых функций человека.*

Производительность труда, достигаемая в основном за счет применения машин, служит самым общим качественным показателем уровня развития техники. Этот показатель непосредственно связан с другим — производительностью машины, выражающейся в количестве вырабатываемого ею продукта в единицу времени.

Производительность машин, а вместе с ней и производительность техники в целом постоянно растут. Это явля-

ется следствием изменения качества машин и внедрения новых машин.

Чем можно оценить качество машины? Ее производительностью. Но производительность машины в свою очередь является следствием ряда факторов, наиболее существенным из которых является *интенсивность*, напряженность работы машины. Интенсивность работы «неживых» машин достигается за счет увеличения скорости движения, напряженности материала, концентрации и интенсификации физических и химических процессов.

Конкретные проявления интенсивности действия машин весьма разнообразны. На рис. 1-18 представлен рост температуры и давления пара в течение первой половины XX в. в паровых котлах электростанций США, на рис. 1-19 — рост давления пара по государственным стандартам на электростанциях СССР. Повышение давления, температуры, скорости газов вызывают повышение удельного паросъема, динамика которого в СССР показана на рис. 1-20.

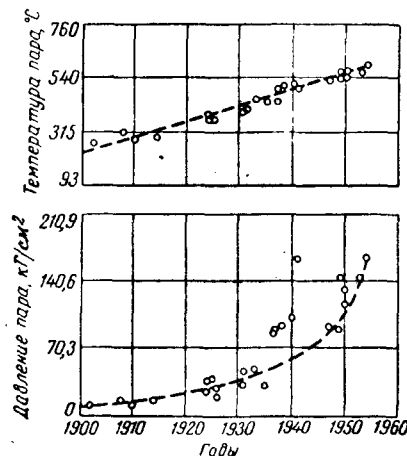


Рис. 1-18. Постепенная (в течение 50 лет) тенденция к повышению давлений и температур пара перед турбиной.

Повышение таких параметров, как давление, напряжение, температура, скорость и т. п., приводят к более напряженной работе материала машин, к уменьшению веса машин на единицу производимой ими продукции, т. е. удельной металлоемкости, что отчетливо видно из рис. 1-21 для гидравлических турбин за целое столетие и на рис. 1-22 для паровых турбин в связи с ростом их мощности за 30 лет.

Итак, одним из качественных показателей развития техники служит *интенсивность* работы технических устройств, выражающаяся в ряде конкретных, измеряемых величин, к числу которых относятся: давление, температура, скорость (объекта или физической среды), напряжение (материала, поля, тока) и др.

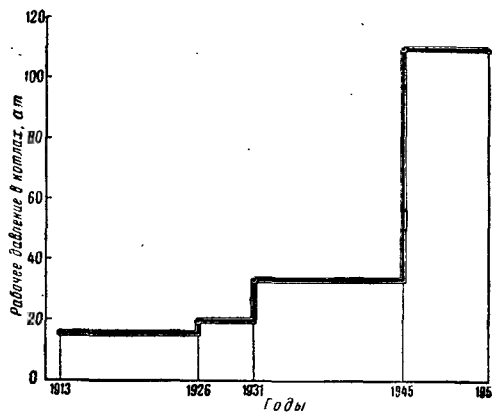


Рис. 1-19. Динамика роста рабочего давления в энергетических паровых котлах СССР.

Исторические материалы показывают, что перечисленные величины *имеют тенденцию возрастания*. Вот некоторые примеры: давление пара выросло от 1 до 300 атм, тем-

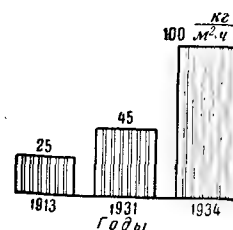


Рис. 1-20. Рост удельного паросъема (кг/м²·ч) котлоагрегатов.

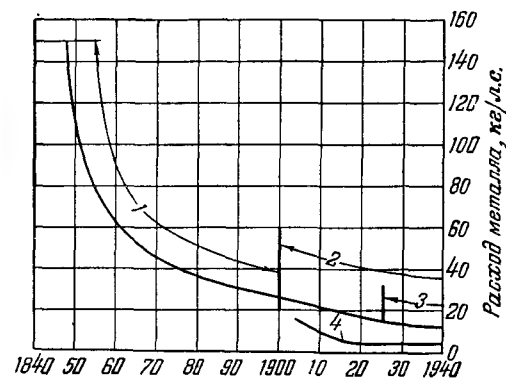


Рис. 1-21. Изменение удельного расхода металла у турбин различных конструкций (по данным завода Эшер и Висс).

1 — турбина Жонвалля и Жирара; 2 — низконапорные радиально-осевые; 3 — поворотнотопластные; 4 — радиально-осевые при $H = 30-200$ м и кондовые (Пельтон) при H свыше 200 м.

пература — от 100 до 600° С, напряжение тока в линии передачи — от десятков до 500 000 в, скорость транспортных агрегатов — от 20—30 км/ч до нескольких тысяч километров в секунду и т. д.

Существует и второй качественный показатель развития техники, основанный на том, что человек как в ручном,

так и в машинном труде использует материальные и энергетические ресурсы природы. Степень этого использования неодинакова. Так, например, на заре металлургии люди умели выплавлять из руды только 30% содержащегося в ней металла, а теперь извлекают его почти полностью.

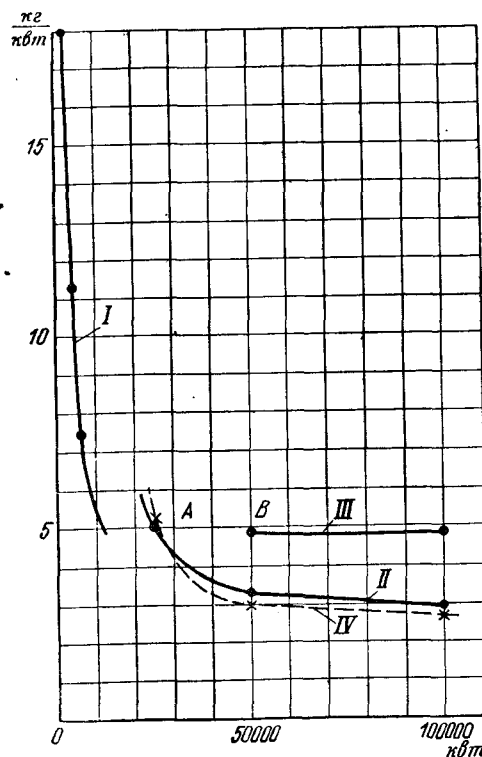


Рис. 1-22. Изменение металлоемкости паровых турбин в зависимости от мощности агрегата.

I — турбина АК при 3 000 об/мин; II — турбина АК большой мощности при 3 000 об/мин; III — турбина АК 1 500 об/мин; IV — турбина ВК при 3 000 об/мин.

Строители ранних энергетических машин — водяных колес — могли использовать не более 15—20% механической энергии, предоставляемой природой.

После открытия универсального закона сохранения и превращения энергии возник удобный метод оценивать совершенство машин коэффициентом полезного действия,

т. е. отношением полезно использованной энергии к расходуемой. Коэффициент полезного действия также может служить качественным показателем развития техники. Анализ обширных данных позволяет заключить, что к. п. д. машин имеет тенденцию роста, что отчетливо видно на рис. 1-23, показывающем рост к. п. д. электропередач. Первая точка — к. п. д. первой в истории электропередачи на сравнительно большое расстояние Мисбах — Мюнхен (1882 г.) порядка 22%, вторая точка — к. п. д. Лауфен-Франкфуртской электропередачи (1891 г.) с к. п. д. порядка 78%, последующее развитие электропередач привело к к. п. д. 95%. Очевидно, что дальнейшее повышение к. п. д. ограничено 5%

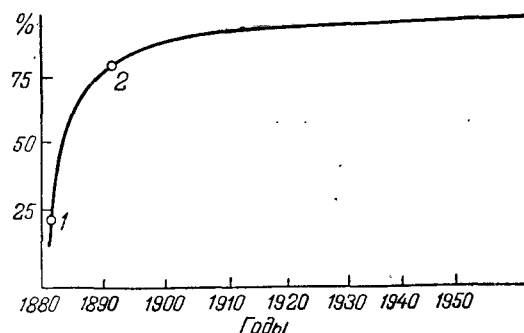


Рис. 1-23. Рост к. п. д. линий дальних электропередач.

Точка 1 — опыты Дебре, 1882 г.; 2 — опыты Доливо-Добровольского, 1891 г.

и к. п. д. растет замедленно, плавно, как показано на рис. 1-23; оно может происходить и скачкообразно в зависимости от отдельных случайностей, но общий характер роста к. п. д., представленный на рис. 1-23, не случаен, а закономерен, так как степень использования того или иного закона природы ограничена определенным пределом: полным 100-процентным (на практике недостижимым) использованием. Наличие подобного предела, выражаемого в виде 1 или 100% при условии однонаправленного изменения (делать машины какого-либо определенного класса с меньшим к. п. д. нет смысла), приводит к закону асимптотического приближения, который отчетливо виден на рис. 1-24 и 1-25, показывающих исторический процесс роста к. п. д. паровых и гидравлических турбин. На рис. 1-26 видно, что к. п. д. паровых машин, повысившийся в 6,9 раза за 41 год

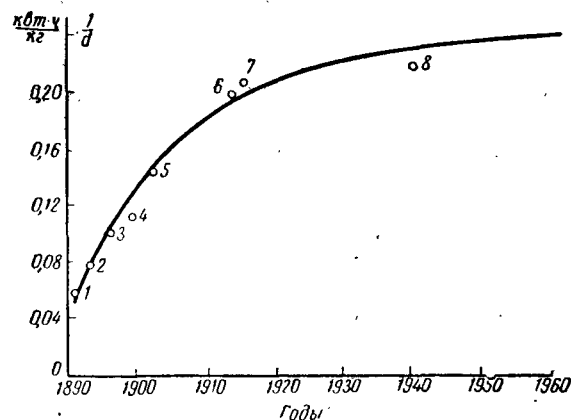


Рис. 1-24. Изменение к. п. д. паровых турбин (кривая построена автором по ряду источников).
 d — расход пара, $\text{кг/квт}\cdot\text{ч}$; точки 1—4, 6 и 7 — турбины Парсонса; 5 — турбина Лавалля; 8 — турбина ХТГЗ.

своего начального развития, в последующие 52 года повысился только в 1,13 раза.

Особый интерес представляет рис. 1-27, на котором отражено изменение двух показателей качественного развития машин. Кривые A_1 и A_2 проведены по усредненным данным большого числа испытаний паровых машин (это число показано цифрой у каждой усредняющей точки) и отчетливо показывают замедленный рост к. п. д. Вместе с тем виден скачок, относящийся к 1825—1830 гг. Этот ска-

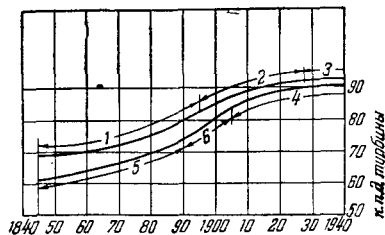


Рис. 1-25. Изменение значений к. п. д. гидротурбин в процессе их развития (по данным завода Эшер и Висс).

1 — турбины Жонваля и Жирара; 2 — радиально-осевые; 3 — поворотнопластинные; 4 — ковшовые (Пельтоны); 5 — активные тангенциальные; 6 — ковшовые.

чок — результат изменения фактора интенсивности, выразившегося во введении перегретого пара, повышении температуры (кривые B_1 и B_2 отражают результаты испытания отдельных лучших машин).

Возникает вопрос о том, есть ли смысл работать над дальнейшим повышением к. п. д. в тех случаях, когда теоретические возможности этого повышения подходят к кон-

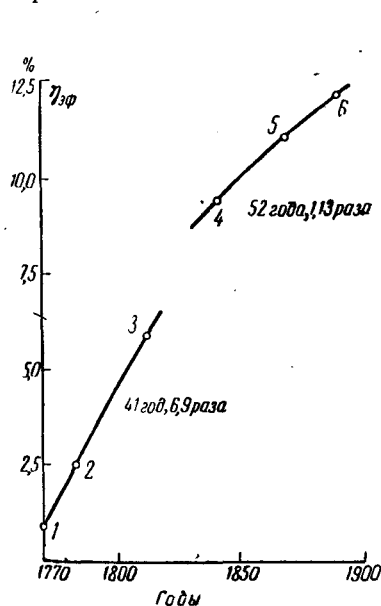


Рис. 1-26. Рост к. п. д. паровых машин с 1770 по 1900 г.

1 — Смитон; 2 — Уатт; 3 — Тревирик; 4 — водоподъемник; 5 — Зульцер; 6 — п/х „Lahn“.

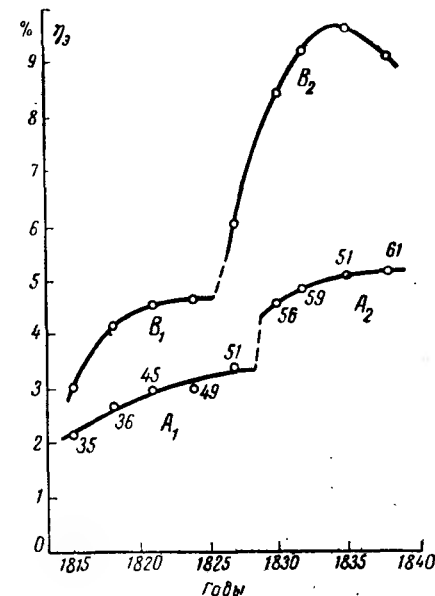


Рис. 1-27. Изменение к. п. д. паровых машин.

Цифры у точек кривых A_1 и A_2 показывают число испытанных машин, для которых точки дают усредненное значение. Кривые B_1 и B_2 построены по испытаниям лучших машин.

цу, когда каждый процент повышения достигается ценой громадного труда, больших капиталовложений и эксплуатационных расходов. Это имеет смысл в том случае, когда речь идет о получении большого и быстро растущего количества потребного обществу продукта. Например, к. п. д. гидравлических и паровых турбин почти совершенно стабилизировался. Но при огромном росте энергопотребления, превышающего в наше время сотни миллиардов киловатт-часов ежегодно, борьба за каждый процент к. п. д. оправ-

дана экономически, так как за этим процентом скрываются громадные абсолютные величины производства энергии.

Возникновение тенденций перехода к новой технике

Стабилизация роста к. п. д. иллюстрируется на рис. 1-28. Количественный показатель растет, его производная по времени стремится к бесконечности, а качественный показатель стабилизировался и его производная по времени стремятся к нулю. Встает вопрос: как быть дальше?

По-видимому, здесь возникает новая проблема, для решения которой имеются необходимые предпосылки. Маркс

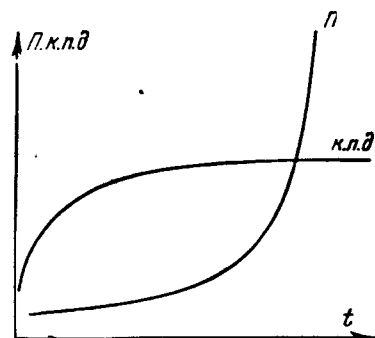


Рис. 1-28. Сопоставление характеров изменений количества полезной продукции P и усредненного к. п. д. технических объектов, используемых при выработке данной продукции.

писал: «...человечество ставит себе всегда только такие задачи, которые оно может разрешить, так как при ближайшем рассмотрении всегда оказывается, что сама задача возникает лишь тогда, когда материальные условия ее решения уже имеются налицо, или, по крайней мере, находятся в процессе становления¹».

В ряде случаев кардинальное решение задачи состоит в обращении к использованию других закономерностей природы путем применения других машин. Так, паровоз начинает заме-

няться тепловозом и электровозом. Коэффициент полезного действия тепловых станций еще значительно повышают путем введения высоких параметров (интенсификация), но и здесь уже намечаются новые решения на основе возникающей новой техники.

¹ К. Маркс, и Ф. Энгельс. Соч. изд. 2-е, 1959, т. 13, стр. 7.

же продукцию на основе использования других законов природы.

Знание двух показателей качественного развития техники существенно для технических работников. Многие инженеры и техники часто односторонне оценивают качественный прогресс техники только по значениям к. п. д. Но экономика шире, чем степени использования законов природы, выражаемые в к. п. д. Поэтому история техники знает немало случаев, когда правильное экономическое решение направлялось на повышение интенсивности в ущерб к. п. д. Примером этого может служить переход от водяных колес с к. п. д. порядка 60—70% к паросиловым установкам с к. п. д. 0,6% в XVIII в. Это делалось для раскрепощения энергетики от местных условий путем повышения показателя интенсивности, выразившегося в энергоемкости носителя энергии природы: 5—10 кГ·м/кг у воды и 3 000 000 кГ·м/кг у топлива.

В настоящее время в СССР взята установка на преимущественное развитие тепловых электростанций по сравнению с гидравлическими. Коэффициент полезного действия последних выше, себестоимость выработанной энергии ниже, но постройка тепловых станций дает возможность более интенсивного энергостроительства, что в данный момент для нашей страны экономически более целесообразно.

Роль личности в развитии техники

Выше было указано, что движущей силой развития техники является потребность общества в материальных и культурных благах, создаваемых или распространяемых при помощи техники, что объем этой потребности возрастает как за счет увеличения числа членов общества, так и за счет увеличения потребностей каждого из них. В социалистическом и особенно коммунистическом обществах обязанность трудиться, чтобы удовлетворять потребность общества, становится личной потребностью. Особое значение имеет деятельность новаторов, изобретателей, прокладывающих новые пути в развитии и овладении техникой.

Большинство буржуазных историков техники считает изобретения плодом гениальных умов, а в качестве метода изобретательного творчества выдвигает счастливый случай. Так, по их представлениям, понятие о гальваническом токе возникло от случайного наблюдения Гальвани за лапкой препарированной лягушки; паровой двигатель с отделенным конденсатором был создан благодаря случайному

наблюдению Уатта за клубами пара, выходявшего из окон прачечной, и т. п.

Подобные ошибочные теории путают следствие с причиной, отходят от закона причинности, трактуя случайное как форму проявления необходимого.

В действительности все изобретения вызваны объективной необходимостью, вытекающей из первичной движущей силы развития общества и, в частности, для техники — из потребности в материальных благах. К. Маркс писал: «Критическая история технологии вообще показала бы, как мало какое бы то ни было изобретение XVIII столетия принадлежит тому или иному отдельному лицу»¹. История техники, как это будет видно из последующих глав, показывает, что и в XIX и в XX вв. крупные вклады в технику делались многими изобретателями независимо друг от друга.

Чем можно объяснить, что в 1880 г. независимо друг от друга Д. А. Лачинов в Петербурге и М. Депре во Франции устанавливают необходимость передачи энергии электрическим током высокого напряжения; что в конце XIX в. Лаваль в Швеции, в Парсонс в Англии изобретают паровые турбины; что в середине XIX в. Ленуар во Франции, а Отто и Ланген в Германии изобретают двигатели внутреннего сгорания; что А. С. Попов в России, а вслед за ним Г. Маркони в Англии почти одновременно изобретают радио и т. д.?

Эти факты и множество других можно объяснить только тем, что совершенно объективно и независимо от воли изобретателей возникает потребность в продукте их творчества: электропередаче, паровой турбине, двигателе внутреннего сгорания, радио и т. п. Это значит, что для понимания субъективной деятельности изобретателя нужно прежде всего оценить объективные условия, поставившие перед ним определенную задачу, так как при этом создаются объективные материальные предпосылки ее решения, а субъективные качества изобретателя дают ему возможность увидеть эту задачу и решить ее.

Полезно знать, каким образом проявляется и доходит до сознания изобретателя движущая сила развития техники — потребность общества в материальных благах. Она обнаруживается в форме постоянно возникающего и постоянно разрешаемого проти-

ворочия между потребностью в материальных благах и возможностью удовлетворения этой потребности.

В свою очередь противоречия между потребностями общества и возможностью их удовлетворения приводят к возникновению и обострению кризиса существующего способа производства материальных благ, проявляющегося по-разному в различные исторические эпохи. Так, в XVIII в. гидроэнергетика оказалась неспособной удовлетворить возросшие потребности промышленности в механической энергии. В результате этого кризиса десятки изобретателей вложили свой труд в изобретение парового двигателя. В XIX в. возник кризис существовавшего механического способа передачи энергии от ее источников к потребителям. Он направил творчество изобретателей на разработку различных методов передачи энергии, среди которых наилучшие результаты дал электрический. Во второй половине XX в. назревает кризис энергетики в связи с ограниченностью ресурсов органического топлива, особенно в ряде районов земного шара, и недостаточностью водных источников при громадном потреблении энергии. Исчерпание ресурсов наступит примерно через 4—5 тыс. лет для угля и через 100—150 лет для нефти. Такие сроки объективно приводят к тому, что ученые и инженеры всего мира начинают работать над использованием ядерной энергии.

Противоречия, подобные описанным, всегда возникали и возникают в отдельных отраслях техники. Но история техники знает и такие переломные моменты своего развития, когда противоречие между потребностью в материальных благах и возможностью удовлетворения этой потребности распространялось на технику в целом, на весь связанный с ней способ производства, вызывая общий кризис, приводило к общей смене методов производства. Примером подобного всеобщего кризиса служат кризис ручного производства и его разрешение путем перехода к машинному производству, известные под наименованием промышленного переворота XVIII в.

Между отдельными составляющими элементами техники в целом (отраслями, объектами, процессами и т. п.) существуют постоянная взаимосвязь и взаимообусловленность. Необходимость удовлетворения постоянно растущей потребности общества в материальных благах приводит к постоянным противоречиям между отдельными элементами техники. Так, например, между современным газо-

¹ К. Маркс, Капитал, т. 1, 1955, стр. 378.

турбостроением и металлургией существует определенное противоречие: качество жароупорных материалов тормозит возможный рост к. п. д. газовых турбин за счет повышения начальной температуры газа. Техника изоляционных материалов тормозит развитие электротехники, задерживая переход к более высоким напряжениям. Пропускная способность последнего венца паровой турбины тормозит рост ее мощности в одновальной установке. Подобные примеры можно приводить без конца. Всегда имеется в наличии какое-то «узкое место», задерживающее развитие данного объекта, процесса, отрасли. Тем не менее такого рода торможения являются проявлением движущей силы развития техники и вполне конкретным проявлением. Они направляют деятельность людей на ликвидацию постоянно возникающих «узких мест», являющихся частными формами кризисов в развитии техники. Затормаживание развития одного элемента техники стимулирует развитие тормозящего элемента.

Приведенные факты показывают, что движущая сила развития техники проявляется в ряде зримых, иногда весьма острых противоречий и кризисов, формирующих *социальный заказ* изобретателю. Если изобретатель не видит социального заказа, то его изобретение, как не направленное на решение объективно возникшей задачи, обречено на гибель.

Социальный заказ, как показывают исторические факты, во многих случаях проявляется весьма остро. Так, например, кризис гидроэнергетики к XVIII в. не позволял обеспечить производство необходимым количеством руды и топлива: шахты и рудники, расположенные вдали от водных источников и, следовательно, лишенные такого двигателя, как водяное колесо, заливались грунтовыми водами. Разоряемые шахтовладельцы объявляли богатые премии тем, кто найдет новые методы водоподъема.

В конце XVIII в. потребность в паровом двигателе с вращательным движением вала стала настолько острой, что один из современников писал о том, что все «без ума» от такой машины. В середине XIX в. в повестку дня стал вопрос об экономичном и дешевом двигателе небольшой мощности. Это нашло отражение, в частности, в опубликовании ряда статей на характерную тему: «Двигатель—спаситель ремесла».

Направления изобретательской деятельности

Прогрессивная роль передового деятеля науки и техники заключается в том, чтобы найти методы решения задачи, выдвинутой социальным заказом. Свободен ли изобретатель в выборе этих методов? Является ли выбор этих методов его личным делом, зависящим только от его желаний, вкусов и устремлений? Нет, не является, ибо изобретатель не свободен в выборе своего решения.

Это происходит потому, что, как писал Марке (см. стр. 44): «...задача возникает лишь тогда, когда материальные условия ее решения уже имеются налицо, или, по крайней мере, находятся в процессе становления». Эти «материальные условия» и определяют метод решения задачи. Так, например, совершенно конкретные условия задачи рудничного водоподъема, поставленные перед изобретателями техникой горного дела XVIII в., явились настолько отчетливыми, что совершенно однозначно определили возможный и наилучший метод решения, найденный Ньюкоменом и Коули (см. стр. 116) в виде пароатмосферного балансирного двигателя.

Когда материальные возможности, находясь в состоянии своего становления, уже показывают пути к решению новых технических проблем, но еще не позволяют осуществить его на практике, между провозглашением нового принципа и его реализацией проходит более или менее длительный срок. Прекрасным примером вызревания возможностей реализации сделанного изобретения является запуск в СССР первых искусственных спутников Земли и Солнца на основе ракетного принципа, предложенного для этой цели К. Э. Циолковским более чем за полвека до осуществления его передовых идей.

Если же задача не возникла, если мысль изобретателя не отражает потребностей общества, то его изобретение не только не нужно, но и неосуществимо. Так, в XVII в. итальянец Бранка предложил активную паровую турбину (рис. 1-29). Разве для привода медленно действующих пестов, показанных на рисунке, нужна была быстрая паровая турбина? Нет, и изобретатель предусматривает тройной редуктор. Но при потребном для эффективной работы числе оборотов деревянная турбина Бранка разлетелась бы в куски. Вот пример изобретения, в котором не было объективной потребности, а вместе с этим и возможности его осуществления.

В чем же тогда заключается роль изобретателя, если

задача ставится объективными условиями развития, а сама ее постановка определяет метод ее решения?

Прежде всего роль изобретателя, новатора, любого инициативного деятеля техники состоит в умении видеть новое. Это умение позволяет увидеть социальный заказ там, где многие его не заметят.

Субъективная способность видеть и задачу и методы ее решения воспитывается условиями жизни и деятельно-

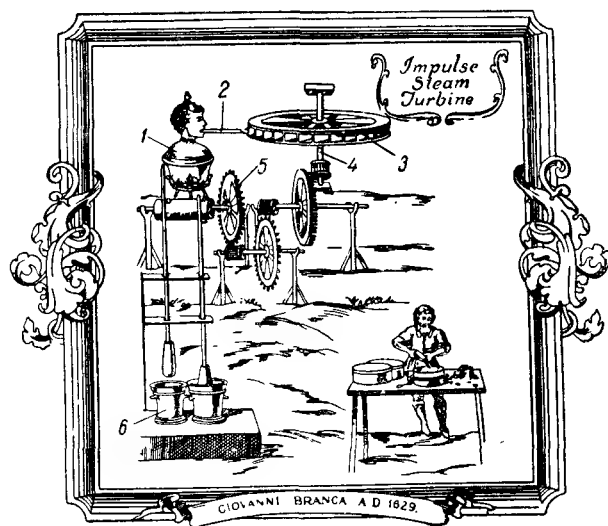


Рис. 1-29. Паровая турбина Д. Бранка (XVII в.).

1 — паровой котел; 2 — длинная трубка (сопло); 3 — колесо машины; 4 — вал колеса; 5 — система зубчатых передач; 6 — толчийный станок.

сти изобретателя, его образованием, пройденной им школой. Значение специального образования в новаторской, изобретательской деятельности становится все сильнее. Это вполне понятно, поскольку, например, для изобретения водяного колеса достаточно было знать только, что вода «давит и бьет»; для изобретения парового двигателя нужно было знать, что существует атмосферное давление, что пары и газы имеют «упругую силу», что холодная вода легко вызывает конденсацию пара; для изобретения электрических генераторов нужно было знать законы электромагнитной индукции; для изобретения реактивного самолета нужно знать законы термодинамики, газодинамики, аэродинамики и данные ряда других наук.

При всем ее разнообразии деятельность изобретателя, новатора можно свести к небольшому числу возможных областей этой деятельности:

а) Изыскание нового технического объекта для удовлетворения материальных и культурных потребностей. Так, в свое время были изобретены лифты и радиоприемники, велосипеды и телевизоры и пр., изобретение которых обуславливалось возникновением материальных возможностей в связи с развитием науки и техники.

б) Изыскание нового способа получения ранее использовавшихся материальных благ: от печного отопления — к центральному; от обычной бритвы — к безопасной, а позднее к электрической; от погреба — к электрохолодильнику; от гусиного пера — к стальному, а позднее к авторучке и т. п.

в) Изыскание методов более эффективного производства материальных благ. Общая эффективность включает в себе конкретные частные формы. Это — или увеличение производительности труда, или интенсификация производственных процессов путем повышения скоростей, напряжений, давлений, температур, удельных нагрузок и т. п., или повышение к. п. д.

Во всех случаях важно понять, что именно требуется от изобретателя. Во многих технических объектах максимум производительности не совпадает с максимумом к. п. д. Известен случай, когда один молодой инженер сконструировал гребные колеса парохода с максимальным к. п. д. в ущерб производительности, в то время как экономические условия требовали всемерного повышения именно производительности.

Таким образом, деятельность изобретателя, новатора вызывается социальным заказом и определяется комплексом конкретных материальных условий; деятельность эта направлена либо на изыскание новых материальных благ, либо на изыскание новых способов получения используемых благ, либо на повышение эффективности их производства.

В деятельности новатора техники большое значение имеет не только умение видеть ростки нового, как бы незначительны они ни были, но и умение правильно оценивать старое, отживающее. В развитии техники имеют место постоянные замены одного вида технических объектов другим, более соответствующим возросшим потребностям. Это значит, что старые технические объекты или целые

области техники перестают использоваться, исключаются из сферы производства. Так, например, в развитых в техническом отношении странах исчезли водяное колесо и каменные мукомольные жернова, постепенно вытесняется паровой поршневой двигатель, прекращается производство паровых локомотивов, не строятся конки, не используется газовое освещение и т. п.

Перечисленные и многие другие объекты техники исключаются из сферы производства, потому что они перестают удовлетворять постоянно растущим потребностям общества. В период своего возникновения эти объекты приветствовались как ускоряющие промышленный прогресс, но с течением времени они стали тормозить его дальнейшее развитие, несмотря на то, что постоянно совершенствовались. Современный паровоз, например, во много раз мощнее, быстрее и экономичнее паровозов Стефенсона или Черепановых (см. стр. 185). Но те паровозы строились, так как они ускоряли развитие транспортной техники, а современные снимаются с производства, ибо они уже тормозят этот процесс. Следовательно, в отличие от живых существ технические объекты отмирают в момент своего наивысшего расцвета. Именно этот высший расцвет, т. е. наиболее полное использование определенных закономерностей природы, ограничивает дальнейшее развитие и выдвигает необходимость замены того или иного объекта более совершенным. Понимание процесса отмирания технических объектов дает возможность легче преодолеть старые традиции и привычки к тем формам техники, которым иногда отданы многие годы творческой деятельности, помогает легче отказаться от этих форм, несмотря на их совершенство (по сравнению с предшествовавшими формами), если у них нет перспектив развития в будущем.

1-3. ПЕРИОДИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ

Связь техники с естествознанием

Поскольку техника в процессе производства материальных благ основывается на законах природы, развитие техники протекает в тесной взаимосвязи с развитием естествознания. Открытые естествознанием законы принимаются на вооружение техникой, изыскивающей методы удовлетворения все возрастающей потребности общества в материальных и культурных благах. Вооружившись этими законами и используя их на практике, техника служит одним из основных критериев проверки правильности вы-

водов естествознания, точности отображения естествознанием реальных процессов и отношений объективного мира.

С другой стороны, техника создает предпосылки для систематизации результатов использования познанных законов природы, помогает развитию естествознания, предоставляя ему возможность обобщить в теорию проверенные на опыте и систематизированные знания. Сложившаяся теория в свою очередь вооружает технику новыми, более широкими возможностями применения данных естествознания, а развивающаяся техническая практика ставит перед естествознанием все новые вопросы и требует на них ответа.

Еще до открытия Архимедом законов рычага и плавания тел производственная деятельность людей подсказывала им закономерности природы в первичной, необобщенной, но весьма конкретной форме, показывающей, что рычаг дает возможность поднимать большой груз, что дерево плавает, а свинец тонет. Не умея ответить на вопрос, почему это происходит, производственная практика поставила перед естествознанием задачу обобщения данных опыта, стимулировавших научную деятельность Архимеда в направлении поисков ответа на вопросы: почему при помощи рычага можно малой силой поднять большой груз, почему судно плавает, а не тонет?

Когда естествознание ответило на эти вопросы, деятели техники, пользуясь найденными решениями, стали рассчитывать рычаги и блоки, водоизмещение и вес корабля, совершенствуя их качество уже не путем длительного и бессистемного опыта, а ускоренным путем сознательного использования законов природы.

Несколько более широкими познаниями законов природы воспользовалась начальная теплоэнергетика (см. стр. 110). Созданная на основе немногих опытных знаний паровая машина поставила перед естествознанием ряд вопросов, а с другой стороны, подготовила реальные возможности их решения. Эти возможности заключались в том, что еще задолго до утверждения в теоретических исследованиях Карно необходимости использования двух источников тепла практика уже применяла их в виде огня и холодной воды, при помощи которых создавался перепад температур. Опыт практической теплоэнергетики, обобщенный в термодинамике, определил возможности нового развития практики, основанного на тепловых расчетах, на борьбе за повышение к. п. д.

Таким образом, естествознание и техника как выражение теории и практики находятся в постоянном взаимодействии, становясь то причиной, то следствием в непрерывном процессе развития. Техника служит критерием правильности выводов естествознания и ставит перед ним задачи обобщения технического опыта, а естествознание дает технике познание законов природы для практического их использования в процессе производства материальных благ.

Основы периодизации развития техники

Процесс развития техники протекает непрерывно. Каждый день техника обогащается новыми изобретениями, предложениями, конструкциями, непрерывно увеличивается количество действующих технических объектов.

Количественные и качественные изменения техники определяют ее состояние или уровень развития в тот или иной исторический период. Так, техника XIX в. отличается от техники XX в. не только тем, что в XIX в. было меньше действующих рудников, машин, станков и т. п., но и качественными показателями технических агрегатов и протекающих в них процессов. Стоит только сопоставить, например, цех завода XIX в. с бесчисленным количеством приводных ремней и тихоходными, малопроизводительными станками с современным цехом, где непрерывный поток продукции обеспечивается автоматизированным электроприводом, чтобы ясно ощутить громадное качественное различие, резко отличный уровень развития техники, неизмеримо более высокое ее состояние.

Наличие качественных изменений техники в целом является основой построения периодизации развития техники, т. е. разграничения качественно различных ее состояний, соответствующих тем или иным историческим периодам.

Марксистская наука установила отдельные периоды развития общества: *первобытный, рабовладельческий, феодальный, капиталистический и коммунистический*. Основой выделения этих периодов является способ производства материальных благ. В соответствии с определением Маркса исторические эпохи в развитии общества отличаются не тем, что производится, а тем, как производится, какими орудиями труда. Техника является одним из существенных звеньев производительных сил общества. В силу закона соответствия производственных отношений характеру про-

изводительных сил качественный уровень техники соответствует общественно-экономическим формациям. Отсюда мы можем говорить о технике первобытного периода, технике рабовладельческого периода, технике феодализма, технике капитализма и технике коммунизма как об основных исторических периодах развития техники.

Сосуществование в настоящее время двух систем — социалистической и капиталистической — при качественно одинаковой технике в передовых в техническом отношении капиталистических и в социалистических странах вызывает вопрос о том, как характеризовать современную технику, находящуюся в странах разных лагерей, — как технику социализма или капитализма.

Такой вопрос находит ответ в том, что основной характерной чертой современного исторического периода является *переход от капитализма к социализму*. Отсюда техника наших дней есть техника переходного периода, которая при дальнейшем ее развитии делается все менее соответствующей капиталистическому обществу и все более соответствующей обществу коммунистическому.

Капиталистические условия становятся препятствием для дальнейшего развития техники, неполностью используют возможности, предоставляемые открытыми законами природы, направляют технику на производство вооружения, омертвляющего затраченные на него труд и средства. В 80-х годах прошлого века в связи с первыми опытами по передаче электрической энергии Энгельс писал о возможности такого развития производительных сил, что «... управление ими будет все более и более не под силу буржуазии». Научный прогноз Энгельса осуществился: производительные силы, заложенные в современной технике электрификации, вышли из-под управления буржуазии и, несмотря на громадные возможности электрификации в империалистических странах, она не способна давать прирост промышленной продукции выше 2—3%.

С другой стороны, социалистические условия предоставили развитию техники широчайший простор. Электрификация, вызывавшая по мере своего развития все большее несоответствие техники условиям капитализма, дала возможность технике стать базой для социализма, что отметил еще В. И. Ленин в своей известной формуле: «*Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны*».¹ Конкретным свидетельством этого соответ-

¹ В. И. Ленин. Соч. изд. 4-е, т. 31, стр. 484.

ствия является прирост промышленной продукции в странах социалистического лагеря, имеющий величину 10—15%.

Вместе с тем переходный период от капитализма к социализму насыщен элементами новой техники, высшей техники коммунистического общества.

Техника по своей структуре состоит из ряда отраслей, среди которых наиболее крупными являются металлургия, энергетика, машиностроение. Перечисленные отрасли выражают три существенных элемента техники: материалы (на что воздействует техника), энергию (чем воздействует техника) и технологию (как воздействует техника). Изменения в этих элементах техники в процессе исторического развития наступали не одновременно, они возникали в недрах существующих общественно-экономических формаций, развивались в них, дополнялись в связи с эволюцией других областей техники, пока, наконец, не наступало общее изменение, приходящее в острое несоответствие с существующей общественно-экономической формацией и приводящее к революционной замене ее новой формацией. Поэтому при изучении истории техники следует установить исторические моменты качественных изменений в отдельных крупнейших областях техники: энергетике, машиностроении и др.

Периоды развития энергетики

В начальный и очень длительный период развития общества человек сам выполнял энергетические функции в процессе производства, являясь единственным двигателем инструментов, орудий и простейших технологических и транспортных машин. Позднее в тех случаях, когда это представлялось осуществимым по характеру производственного процесса и было экономически целесообразно, функции двигателя были возложены на животных.

Таким образом, начальный период развития энергетики характеризуется исключительным использованием так называемой мускульной силы или, точнее, биологической энергии человека и животных. Это — первая ступень развития энергетики — период *биологической энергетики*, или *биоэнергетики*.

Следующей, второй, ступенью в развитии энергетики явилось применение энергии неживой природы. Первыми источниками этой энергии, привлеченными к энергоснабжению производственных процессов, были водные, а несколько позднее — воздушные потоки, приводившие в действие водяные и ветровые колеса. Эти два вида энерго-

снабжения — и ветро- и гидроэнергетика — характеризуют один и тот же исторический период развития способа производства. Они не только совпадают по времени преимущественно, но и однородны по своей физической сущности, представляя собой непосредственное использование имеющихся в природе источников *механической* энергии для приведения в движение исполнительных машин. Поэтому при выделении качественно отличной ступени развития энергетики целесообразно объединить родственные по времени, характеру и физическому содержанию гидро- и ветроэнергетику, обозначив их термином *механическая энергетика*.

Следующая, третья, ступень развития энергетики началась с использования теплоты как источника механической работы. *Теплоэнергетика* возникла в начале XVIII в. в частной форме водоподъемных двигателей и стала быстро развиваться с конца XVIII в. в связи с внедрением в промышленность и транспорт универсального парового двигателя.

В конце XIX в. теплоэнергетика, являющаяся и в настоящее время количественно преобладающей, получила, равно как и гидроэнергетика, значительный стимул к ускоренному развитию благодаря производству электрической энергии. Электрическая энергия не берется непосредственно из природы, а вырабатывается на тепловых, гидравлических и других электростанциях. Поэтому электроэнергетика как вторичная энергетика, привлекаемая благодаря своей транспортабельности и трансформируемости в другие виды энергии, не явилась самостоятельной, независимой формой энергетики. Она не заменила первичные теплоэнергетику и гидроэнергетику, а наоборот, стимулировала их дальнейшее, весьма ускоренное развитие, знаменуя вместе с ними следующий, четвертый, период развития *комплексной энергетики*.

Новым этапом в развитии энергетики явилась возникшая в середине XX в. *атомная энергетика*, источником которой может служить искусственно вызываемый распад тяжелых или соединение легких ядер атомов.

Последовательные качественные ступени развития энергетики могут быть представлены следующим кратким перечнем:

1. *Биоэнергетика* — использование в качестве источника механической работы биологической энергии человека и животных.

2. *Механическая энергетика* — использование механической энергии потоков воды и воздуха.

3. *Теплоэнергетика* — использование в качестве источника механической работы теплоты, выделяющейся при сжигании топлива.

4. Современная *комплексная энергетика* — преимущественное использование в качестве первичной энергии тепловой и гидравлической, а в качестве вторичной — электрической энергии.

5. *Атомная энергетика* — использование энергии ядерных реакций.

Для перечисленных ступеней развития энергетики характерен некоторый количественный показатель, свойственный каждому из отдельных форм энергии. Таким показателем является *удельная весовая энергоемкость* носителя энергии, выражаемая отношением количества механической работы в килограммометрах ($\text{кг} \cdot \text{м}$) к единице веса энергоносителя, т. е. в $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{кг}$. Для живых двигателей подобный показатель неприменим вследствие особых форм восполняемости живого энергоносителя за счет биологической энергии. Тем не менее в отдельных случаях в косвенной форме энергоемкость живых двигателей может быть успешно привлечена для оценки исторических ступеней развития энергетики. Так, например, если для современного океанского судна водоизмещением 80 000 т привлечь в качестве двигателя людей, как это делалось в античном мире, то для необходимой мощности 70 000 л. с. потребуются свыше 2 млн. гребцов (при трехсменной работе), вес которых без багажа и запасов продовольствия в несколько раз превысит вес самого судна.

Что касается энергоносителей неживой природы, то здесь показатель удельной энергоемкости выражается достаточно точными цифрами и позволяет не только объяснить исторические факты, но и сделать прогнозы на будущее.

Носитель гидроэнергии — вода — располагает запасом энергии в зависимости от возможной высоты падения. Так, 1 кг воды может располагать работой в 1, 10, 100, 1 000 $\text{кг} \cdot \text{м}$ в зависимости от высоты падения в 1, 10, 100, 1 000 м. Еще меньшей энергоемкостью обладает носитель ветровой энергии — воздух, энергоемкость которого к тому же постоянно и бессистемно изменяется в зависимости от скорости ветра.

Носитель тепловой энергии — топливо — обладает весь-

ма высокой энергоемкостью. Удельная теплотворная способность топлива колеблется в пределах 2 000 — 11 000 ккал/кг. Так как 1 ккал эквивалентна 427 $\text{кг} \cdot \text{м}$ работы, то удельная энергоемкость 1 кг топлива будет лежать в пределах 854 000 — 4 697 000 $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{кг}$, или в среднем равна 2 775 500 $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{кг}$ (для сопоставления без значительной погрешности можно принять округленное значение 3 млн. $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{кг}$). Даже если учесть, что к. п. д. тепловых установок в среднем примерно в 3 раза ниже, чем к. п. д. гидравлических, высокая энергоемкость горючего дает выход практически реализуемой энергии, в десятки тысяч раз больший, чем энергоемкость воды.

Энергоемкость электрической энергии является понятием несколько условным, поскольку эта энергия вторичная, преобразуемая из других видов энергии. Во всех случаях получения электроэнергии ее количество, относимое к весу генерирующего устройства (паротурбогенератор, дизельгенератор, гидрогенератор, гальваническая или аккумуляторная батарея), незначительно. Поэтому с позиций удельной энергоемкости электрическая энергия не играет такой роли, как тепловая, являющаяся в настоящее время в силу высокой энергоемкости топлива монопольной для водного и воздушного транспорта и преобладающей для наземного.

Использование ядерной энергетики с позиций удельной энергоемкости, безусловно, знаменует громадный скачок к новой качественной ступени развития энергетики.

Исчисленная удельная энергоемкость ядерного горючего выражается в среднем в $8,5 \cdot 10^{12}$ $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{кг}$ по ядрам тяжелых изотопов и $64 \cdot 10^{12}$ $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{кг}$ по термоядерным реакциям, что в миллионы раз превышает среднюю энергоемкость обычного горючего. Даже если принять возможным использование только 10% располагаемой энергии ядерного горючего, энергоемкость носителей ядерной энергии более чем в миллион раз превосходит энергоемкость обычных энергетических топлив.

Отсюда вытекает ряд новых качеств исключительной значимости. Тысячи вагонов угля, потребляемого ежегодно тепловой электростанцией, могут быть заменены несколькими десятками килограммов ядерного горючего, и, таким образом, энергоемкий и дорогостоящий транспорт больших количеств топлива может быть практически исключен. Намечается грядущая эра совершенно независимой от локальных условий энергетики, когда каждый энергопотреб-

ляющий объект в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и в быту сможет в любом месте располагать громадными количествами необычайно концентрированной атомной энергии, расходуемой в самых разнообразных целях: нагрева, охлаждения, кондиционирования, связи, транспорта, привода орудий и машин.

Итак, в развитии энергетики должны быть отмечены следующие ступени, характеризующие резкое отличие применяемых форм энергии по весовой энергоемкости, оказывающей громадное влияние на развитие техники:

1. Использование первичной механической (гидравлической и — в меньшей степени — ветровой) энергии с удельной энергоемкостью порядка $10—1\,000 \text{ кГ} \cdot \text{м/кг}$.

2. Использование первичной тепловой энергии со средней энергоемкостью $3 \cdot 10^6 \text{ кГ} \cdot \text{м/кг}$.

3. Использование первичной ядерной энергии с энергоемкостью $8,5 \cdot 10^{12}—64 \cdot 10^{12} \text{ кГ} \cdot \text{м/кг}$.

Для исторического процесса развития орудий и машин характерна тенденция замены человека-исполнителя различных производственных функций машинами.

Указание на это содержится в формулировке Маркса: «Простые орудия, накопление орудий, сложные орудия; приведение в действие сложного орудия одним двигателем — руками человека, приведение этих инструментов в действие силами природы; машина; система машин, имеющая один двигатель; система машин, имеющая автоматически действующий двигатель, — вот ход развития машин»¹.

Самые ранние машины были созданы для подъема и перемещения тяжестей. Сначала они только помогали человеку в выполнении транспортных функций, а затем и заменили его. Освобождение человека от функции двигателя началось при помощи первой повозки, подвижной прирученными животными.

Применявшиеся простые и даже сложные орудия первоначально приводились в действие «одним двигателем — руками человека». Однако следующий шаг в периодизации Маркса — «приведение этих инструментов в действие силами природы» — уже означает возникновение одной из форм замены человека машиной, характеризующейся передачей энергетических функций от человека машине.

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс, Соч., т. 4, 1955, стр. 156.

Этот процесс прежде осуществлялся там, где от исполнителя не требовалось ни мышления, ни навыков, ни познаний — ничего, кроме механической энергии, отдаваемой например, рукоятке ворота или мельничного жернова в форме однообразного циклического движения.

Следующая форма замены человека машиной видна из применения Марксом слова «машина», под которой он подразумевал машины-орудия, заменившие руки, пальцы, а следовательно, производственные навыки, умение, квалификацию рабочего.

Далее определение Маркса предусматривает развитие отдельной машины в целую систему машин, основанную на том же принципе замены рабочего машиной в выполнении технологических производственных функций. Затем отмечается новый этап, характеризующийся системой машин, «имеющих один двигатель».

Другая форма замены человека машиной отражается в определении Маркса о возникновении автоматического производства. Здесь на машину возлагаются ранее выполнявшиеся человеком функции контроля и управления ходом тех или иных технологических процессов. Осуществляя контрольные функции, автоматическая машина должна регистрировать отклонения от заданного режима, реагировать на них, восстанавливать режим. Так область использования машины значительно расширяется.

Наконец, если продолжать определение Маркса применительно к технике нашего времени, то нетрудно увидеть, что современные счетно-решающие устройства начинают собой новую, высшую форму замены человека — машина вместо человека выполняет ряд логических функций: запоминание, решение уравнений, отбор, классификация по заданным признакам, переводы.

Таким образом, ведущая тенденция в развитии орудий и машин — это последовательное освобождение человека от все более и более сложных функций его практической производственной деятельности. В развитии этой тенденции отчетливо выступают отдельные качественные периоды:

1. Весь комплекс многообразных составляющих физической и интеллектуальной деятельности человека в производстве материальных благ выполняется самим человеком. Применяемые инструменты и орудия только удлиняют его естественные рабочие органы.

2. Человек заменяется транспортными машинами, прирученными животными (прирученные животные).

3. Человек в выполнении им функций двигателя заменяется энергетическими машинами, использующими неорганическую энергию природы (переходный период — биологическая энергия животных).

4. Человек заменяется машиной в выполнении технологических производственных функций, требующих от исполнителя навыков, умения, квалификации (замена рук рабочего машиной и передача машине орудия).

5. Человек заменяется автоматизированными системами машин в выполнении функций контроля и управления производственным процессом и поддержания этого процесса в заданном режиме.

6. Человек заменяется счетно-решающими машинами в выполнении ряда логических операций.

Итак, за необычайно сложным комплексом разнообразных инструментов, орудий, машин и их систем выступают только шесть основных качественно различных ступеней развития. Здесь самая общая движущая сила развития — производство материальных благ — проявляется в более конкретной форме, присущей уже не только развитию общества в целом, но и развитию техники. Связь между общественным процессом и техникой проявляется в достаточно отчетливой форме: постоянный рост потребности в материальных благах может удовлетворяться главным образом путем роста производительности труда, а последняя может возрастать в результате передачи производственных функций машине, т. е. замены человека машиной в выполнении транспортных энергетических, технологических, контрольных и, наконец, логических функций.

Техника создается на основе использования познанных законов природы. Потому выявление основных характерных ступеней в развитии естествознания существенно для понимания развития техники. Науке известны определенные этапы в истории естествознания. Наиболее общей и широкой характеристикой каждого из этих этапов является степень научного проникновения человека в структуру окружающего материального мира. Здесь известны следующие отдельные ступени развития познания:

1. Окружающий мир, его вещество и энергия познаются как континуум, т. е. непрерывные субстанции. Отдельные чисто логические построения древних философов о наличии атомов, приводившие к выводу о дискретности вещества,

не имели значения для развития производства в его ранней стадии, когда под непосредственным влиянием практики складывались начала классической механики твердых тел, жидкостей и газов.

2. Атомистическая теория строения вещества получает экспериментальное обоснование. Разрабатываются основы классической химии атомов и молекул. Кинетическая теория теплоты является одним из решающих факторов в установлении закона сохранения и превращения энергии.

3. Открытие явлений радиоактивности позволяет познать сложную структуру атома. Физика и химия претерпевают значительные изменения. Познание структуры объективного мира обогащается открытием сложного комплекса составляющих атома. Устанавливается дискретность энергии.

4. Научное познание проникает внутрь атомного ядра; открытие ряда «элементарных» частиц. Возникают новые возможности получения вещества и энергии в любых необходимых количествах и любых нужных формах.

Перечисленные ступени развития познания объективного мира отчетливо проявляются в его использовании в целях производства материальных благ. Как «умельцам» далекого прошлого, строившим немудреные деревянные водяные колеса, так и конструкторам современных мощных гидротурбин нет нужды считаться с дискретной структурой воды как носителя энергии: познание воды как континуума полностью удовлетворяет самые сложные гидродинамические расчеты. Но последующая ступень развития энергетики — теплоэнергетика — уже использует закономерности теплового движения молекул и атомов. Развитие электротехники с ее многообразными отраслями невозможно без познания закономерностей природы элементарных частиц периферийной структуры атома. Наконец, атомная энергетика требует проникновения внутрь ядра атома.

Связь ступеней развития энергетики со ступенями познания структуры материального мира — только одна из множества связей, рассмотрение которых целесообразно при исследованиях периодизации развития техники.

Действительно, энергетика связана, например, не только с естествознанием, но и с организационными формами производства; возможность замены человека машинами — со степенью познания законов природы; используемый

Таблица 1-1

Ступени развития орудий и машин	Ступени развития методов замены человека машинами	Ступени развития энергетики (по формам энергии)	Ступени развития энергетики (по энергоемкости)	Ступени использования основных материалов производства	Ступени развития организационных форм производства	Ступени познания структуры окружающего материального мира	Ступени развития способов производства
„Простые орудия“ ¹ , накопление орудий	Вся совокупность элементов производственного процесса выполняется человеком	Биологическая энергия человека	—	Камень, бронза	Простая кооперация; выделение ремесла	Абстрактные обобщения отсутствуют	Первобытно-общинный
„...Сложные орудия, приведение в действие сложного орудия одним двигателем—руками человека“	Начало замены человека в исполнении функции двигателя другими живыми двигателями	Биологическая энергия человека и животных	—	Камень, бронза, медь, железо	Ремесленное производство; sporadическое применение простой кооперации	Континуум (ограниченные логические представления о дискретности материи; понятие об атоме как мельчайшей частице материи)	Рабовладельческий
Начинается „...приведение этих инструментов в действие силами природы“	Начало замены человека в исполнении функций двигателя двигателями неживой природы	Механическая энергия природы (гидравлическая и ветровая энергия)	5—50 кг·м/кг	Железо, углеродистая сталь	Цеховое ремесленное производство	Континуум; начало опытной науки	Феодалный
Более широко используется „...приведение этих инструментов в действие силами природы“	Более широкая замена человека в использовании функций двигателя двигателями неживой природы	Начало применения тепловой энергии	5—100 кг·м/кг	Углеродистая сталь; начало применения легированных сталей	Мануфактурное производство (ручное, с широким разделением труда)	Обращение к теории дискретности материи для объяснения данных опыта—кинетическая теория тепла	Переходный от феодального к капиталистическому (период первоначального накопления)
„...машина; система машин; система машин, имеющая один двигатель“	Начало замены человека в исполнении технологических производственных процессов	Тепловая энергия	3 млн. кг·м/кг	Углеродистая и легированная стали, начало применения специальных сплавов	Машинное производство	Молекулярно-атомная структура вещества	Капиталистический
„...система машин, имеющая автоматически действующий двигатель“ ¹ (автоматические поточные линии)	Замена человека в исполнении функций контроля и направления производственных процессов	Тепловая энергия, гидравлическая энергия, электрическая энергия	5 кг·м/кг—3 млн. кг·м/кг	Легированная сталь, алюминий, специальные сплавы; синтетические материалы	Автоматическое серийное и поточное производство	Элементарные частицы; электрон, нейтрон; познание дискретности энергии; начало проникновения в ядро атома	Кризис капитализма; возникновение социализма с превращением его в мировую систему
Всестороннее развитие автоматического производства	Начало замены человека в исполнении логических функций	Внутриядерная энергия и все предыдущие виды энергии	До 64 триллионов кг·м/кг	Возникновение принципиальной возможности получения материалов с любыми свойствами	Высшие формы автоматического производства	Дальнейшее проникновение в ядро атома	Коммунистический

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс, Соч., т. 4, 1955, стр. 156.

техникой материал — с технологическими процессами. Наконец, сам способ производства является проявлением связи между производительными силами, в состав которых входит техника, и производственными отношениями.

Примеров взаимосвязи элементов техники как между собой, так и с элементами других объектов, не входящих в состав техники в процессе их совместного развития, можно привести очень много. Для удобства обозрения таких примеров с выделением отдельных элементов (орудия, энергетика, естествознание, материалы, энергоемкость и т. п.) и качественных ступеней исторического развития каждого из них целесообразно представить эти примеры в форме таблицы (табл. 1-1).

Каждый вертикальный ряд таблицы отведен для размещения предельно сжатых характеристик отдельных последовательных качественных ступеней развития какого-либо одного из рассматриваемых элементов.

Горизонтальные ряды таблицы содержат в себе примеры совпадающие по времени качественные ступени развития отдельных элементов (абсолютного совпадения быть не может в силу отмеченных выше и обуславливаемых самим процессом развития отставаний и опережений).

Вместе с тем каждый горизонтальный ряд таблицы в целом, безусловно, представляет собой совокупность объектов и их элементов, качественно отличную от выше- и нижележащих совокупностей. Общей качественной характеристикой каждой из указанных совокупностей является представленный в последнем вертикальном столбце способ производства. Эта характеристика охватывает объекты и их элементы, размещенные в других вертикальных столбцах.

Таблица, являющаяся лишь первым приближением к сложному действительному процессу исторического развития, позволяет сделать некоторые выводы.

Прежде всего таблица отражает проявление закона ответственности производственных отношений характеру производительных сил. Она показывает, как отдельные составляющие техники в своем историческом развитии проходят последовательные качественные ступени, из которых складываются качественные ступени развития техники в целом. Из таблицы видно, что периодизация развития техники в целом как элемента производительных сил общества в основном совпадает с периодизацией развития общества.

В таблице намечены и ступени развития областей, не

входящих в состав техники. Это прежде всего область научной деятельности, направленной на познание структуры окружающего материального мира. Эта деятельность, как видно из таблицы, имеет в своем развитии определенные связи с развитием техники. Не менее интересна связь развития техники с использованием материалов для производства орудий, представленным в одной из колонок таблицы. Большое значение для понимания развития техники имеет смена организационных форм производства, меняющихся с изменением техники и показанных в одном из вертикальных столбцов таблицы.

Приведенные в данной главе в самой краткой форме закономерности и тенденции развития техники помогут более четко осмыслить и лучше понять причинность и обусловленность развития энергетической техники.

ГЛАВА ВТОРАЯ

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ДО ПРОМЫШЛЕННОГО ПЕРЕВОРОТА

2-1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТЕХНИКИ

В энергетике современного промышленного и сельскохозяйственного производства доля мускульной силы человека составляет менее 1%, в то время как в начальный период развития общества она доходила до 100%. Это значит, что энергетика сильнее всего содействовала замене труда человека работой машин. Энергия является одним из средств производства материальных благ. Поэтому возникновение и развитие энергетики происходили в тесной связи с другими отраслями техники, которые в значительной степени и определяли пути ее развития.

Энергетика в своей начальной форме — биологической — возникла раньше, чем машины, и предназначалась для обеспечения действий орудий в процессе труда, направленного на создание материальных условий жизни общества. Эти условия создавались и создаются в процессе постоянных взаимоотношений человека с природой.

Ранние взаимоотношения между человеком и природой, унаследованные человеком от животного мира, сводились преимущественно к *присвоению готового продукта* природы. Частными видами присвоения являются: собирание,

охота, рыболовство. Дальнейшим шагом в развитии отношений человека к природе явилось его *воздействие на природу с целью увеличения ее продукта*: земледелие, животноводство. Наконец, деятельность человека начала выражаться в наиболее высокой форме, когда он, используя материал и энергию природы, начал производить материальные блага, не существующие в природе: одежду, утварь, жилища, пищу. *Производство* как высшая форма деятельности возникло в целях изготовления орудий еще в период присвоения готовых продуктов природы. Орудия, способствовавшие присвоению готового продукта природы (охотничьи копыя, лук и стрелы, бумеранг, рыболовные снасти и т. п.), начали свое развитие с простейшего орудия — камня-ударника. Орудия, обеспечивавшие воздействие на природу (лопаты, мотыги, плуги и т. п.), начали свое развитие с заостренной палки. В дальнейшем производство развивалось в двух основных направлениях: производство орудий (более широко — средств) производства и производство материальных благ (продуктов потребления).

В настоящее время присвоение продуктов природы обеспечивается чрезвычайно сложным комплексом орудий. Современные методы воздействия на природу научно обоснованы, технически совершенны и позволяют уверенно получать предполагаемые результаты этого воздействия; наше время — время роста и развития сельскохозяйственного производства в самом широком смысле этого понятия.

Возникновение всех основных форм связи человека с природой произошло в период первобытно-общинного строя, изучение которого важно для понимания последующего развития производительных сил общества. Начальный период — это период становления самого человека, отход его от животного, осуществлявшийся тысячами в процессе сознательного труда. Применение самых примитивных орудий для присвоения готовых продуктов природы и простейшего воздействия на природу развивало не только руки человека, но и его мышление. Таким образом, как указывал Ф. Энгельс в своей книге «Роль труда в процессе превращения обезьяны в человека», рука человека являлась не только органом труда, но и его продуктом. Необходимость предвидеть результат своего труда в значительной степени сделала продуктом труда и мышление. В процессе труда возникло и развивалось средство общения между людьми — *речь*.

Начальный период развития орудий труда

К. Марксом определена следующая ниже последовательность развития орудий труда: простые орудия, накопление орудий, сложные орудия; приведение в действие сложного орудия одним двигателем — руками человека, приведение этих инструментов в действие силами природы; машина; система машин, имеющая один двигатель; система машин, имеющая автоматически действующий двигатель. Первые четыре этапа приведенной периодизации получили свое становление в период первобытно-общинного строя.

Простое орудие, не имевшее отдельных составных частей, возникло за многие тысячелетия до нашей эры в ранний период каменного века (палеолит) в виде ударника из кремня, которому путем скалывания придавалась форма, удобная для охвата его пальцами руки (рис. 2-1). Позднее из того же кремня путем откалывания изготовлялось режущее орудие, отличающееся наличием острой кромки (рис. 2-2).



Рис. 2-1. Ручные ударные орудия из кремня.

По этим ранним видам орудия можно установить, что их конструктивная форма определялась познанными закономерностями природы, которые диктовали единство конструктивной формы и технологического процесса. Так, процесс использования кремневого ударника (как и современного молотка) заключается в аккумуляции энергии в поднимаемом орудии за счет эквивалентной затраты биологической энергии работника; здесь действует живой механизм — рука, при помощи которого биологическая энергия преобразуется в механическую. Процесс резания кремневой пластинкой (как и современным ножом) заключается в создании громадного удельного давления путем концентрации усилия человека на малой поверхности лезвия. Оба процесса основаны, очевидно, на закономерностях природы, которые человек открывал путем опыта, показывающего ему, что ударник должен быть тяжелым, а кремневый нож — острым, что именно эти конструктивные формы способны произвести желаемое действие — раздробить кость, отрезать кусок мяса. Трудовая

деятельность давала возможность накапливать сведения для совершенствования орудий труда и способов их применения. В процессе трудовой деятельности складывались первые предпосылки для последующего возникновения науки о природе.

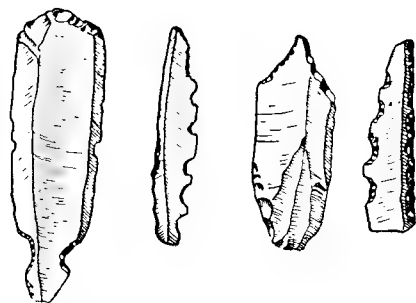


Рис. 2-2. Ручные режущие орудия из кремня.

Составное орудие — простейший вид сложного орудия — расширило возможности аккумуляции энергии за счет увеличенной при помощи рукоятки высоты подъема топора или молота и сделало удар настолько эффективным, что человек оказался в состоянии вступить в единоборство с крупными представителями животного мира (рис. 2-3). Значительно больший эффект по сравнению с заостренной палкой был достигнут применившимися в земледелии составными орудиями (мотыга, лопата). В процессе изготовления сложных орудий человек освоил новый технологический процесс — сверление, осуществляемое путем применения не свойственного рукам человека вращательного

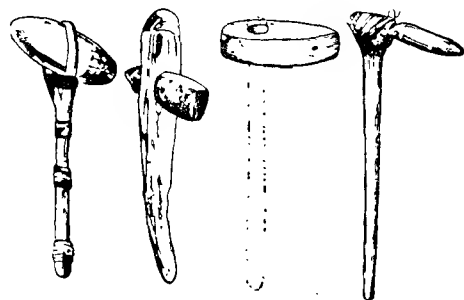


Рис. 2-3. Составные орудия (каменные молоты, топор и мотыга с деревянными рукоятками).

движения, осуществленного в первых сверлильных устройствах, представлявших собой достаточно сложное сооружение, перерастающее в машину (рис. 2-4).

Ранним сложным орудием, значительно расширившим

возможности человека в области присвоения, явился лук со стрелами, «Лук, тетива и стрела составляют уже очень сложное оружие, изобретение которого предполагает долго накапливаемый опыт и изощренные умственные силы, следовательно, и одновременное знакомство со множеством других изобретений»¹. Этими другими изобретениями, обнаруженными при археологических изысканиях, явились, устройства, при помощи которых выполнялись такие технологические приемы, как шлифование, пиление или сверление. Благодаря этому стало возможным изготавливать шлифованные топоры и молоты, наконечники стрел и копий, кинжалы и ножи, рыболовные крючки, бумеранги, челноки (из целых древесных стволов) и весла к ним.

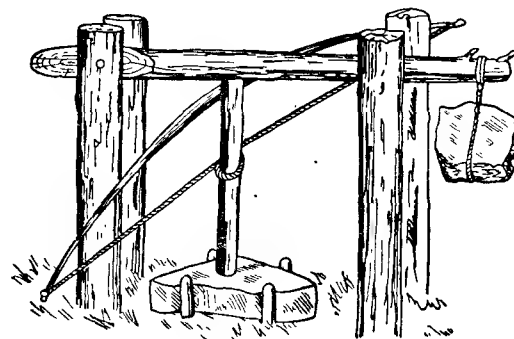


Рис. 2-4. Сверлильный снаряд.

В приведенном перечне многие орудия сохранили свое значение до настоящего времени: топоры, молоты, ножи. Это значит, что за многие тысячелетия до нашей эры были найдены рациональные конструктивные формы орудий и при их посредстве осуществлялись целесообразные технологические процессы. Действительно, современный молот или топор отличается от первобытного только материалом, из которого он изготовлен. Стабильность конструкции молота, топора и других орудий, изобретенных в глубокой древности, не случайна. Прежде всего в древнейших орудиях, созданных на основе опыта, были использованы закономерности природы, используемые и в наше время. Кроме того, перечисленные орудия в настоящее время, как и в далекие от нас времена, применяются в качестве руч-

¹ Ф. Энгельс, Происхождение семьи, частной собственности и государства, Госполитиздат, 1951, стр. 21—22.

ных орудий. А поэтому их вес и размеры, определяемые возможностями руки человека, сохранились постольку, поскольку остались неизменными рука и ее возможности.

Возникновение элементов машины

Стимулом к применению машин явилось возникновение потребности в осуществлении таких процессов, которые человек мог выполнять с большим трудом или даже совершенно не мог выполнять.

Одним из первых трудовых процессов, с которым человек оказался не в состоянии справиться непосредственно усилием своего организма, явились подъем и перемещение больших тяжестей. Изучение приемов строительства древ-

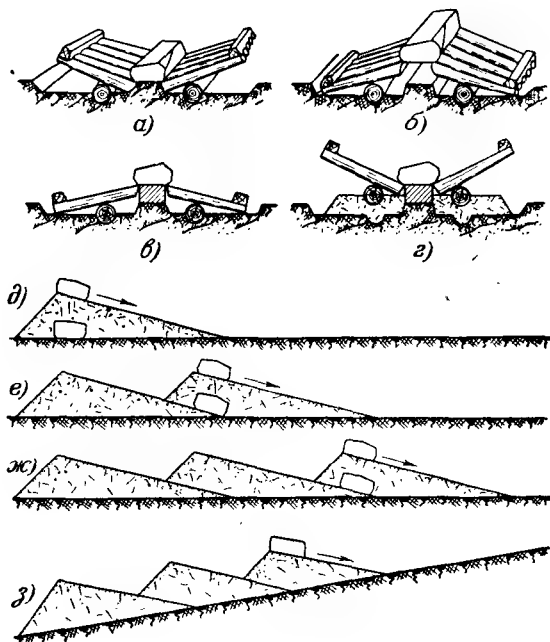


Рис. 2-5. Подъем и перемещение крупных камней.

них жилищ и сооружений ритуального характера из громадных каменных плит позволило установить метод подъема и перемещения этих плит при помощи рычага. На рис. 2-5 показаны последовательные положения камня при его подъеме и перемещении методом террасирования с применением рычагов. Следует отметить, что в этом случае, как и во многих других, научное обобщение опыта после-

довало на тысячелетия позднее его практического применения.

Возникновение элементарной транспортной машины прежде машин других назначений объясняется тем, что с задачей подъема и перемещения тяжестей, превосходящих возможности человека, пришлось столкнуться ранее всего, а простейшее решение подобной задачи при помощи рычага уже имелось. Однако первобытное общество оставило следы своей деятельности и в области технологических машин в их простейшей форме. К числу таких машин

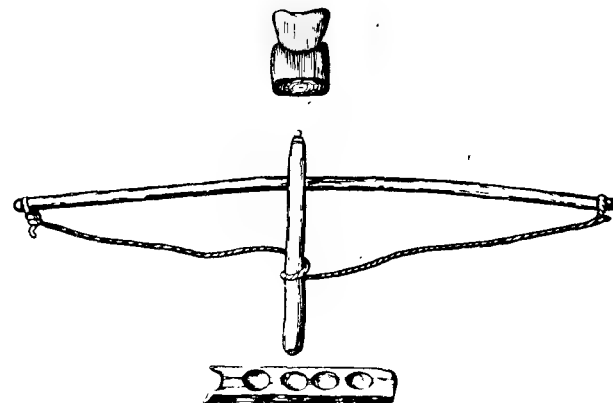


Рис. 2-6. Огневое сверло с луком.

следует отнести уже упоминавшийся примитивный станок для сверления (рис. 2-4), в котором достигается изменение формы движения: более свойственное живому организму возвратно-поступательное движение руки преобразуется во вращательное движение сверла.

Вращательное движение наиболее широко распространено в современной технике. Оно осваивалось в ранний период жизни общества не только в форме возвратно-вращательного движения, как в сверлильном станке или «огневом сверле» для добывания огня (рис. 2-6), но и в форме однонаправленного вращательного движения. В этой форме вращательное движение было постепенно освоено в гончарном ремесле. Одним из древнейших методов изготовления сосудов была лепка их из длинных глиняных валиков, накладываемых спиралью (рис. 2-7). Круглая форма сосудов определялась также применением в качестве основы для посуды плетенки из гибких прутьев, обмазываемых глиной. Плавный изгиб

прута, исключавший его поломку, приводил к круглой форме сосуда.

Процесс изготовления сосудов, имеющих форму тела вращения, потребовал от ремесленника поворачивания изделий, что постепенно привело к переходу к быстрому вращательное движение (рис. 2-8). Так возникла еще одна простейшая технологическая машина — гончарный круг, дающая еще один пример использования закономерностей



Рис. 2-7. Изготовление глиняных сосудов налепом.

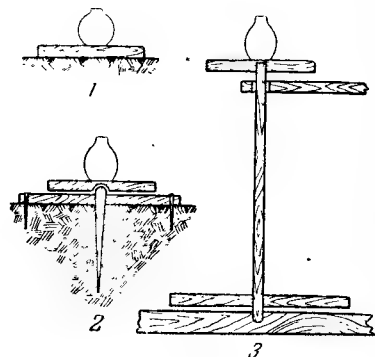


Рис. 2-8. Эволюция гончарного круга.

1 — неподвижный круг; 2 — круг с медленным вращением от руки; 3 — круг с быстрым вращением. Вращение верхнему кругу с установленной на нем заготовкой передается от нижнего круга, сидящего на одной оси с первым и приводимого во вращение ногами гончара; одновременно массивный нижний круг выполняет функцию маховика.

природы на основе практического опыта и задолго до формирования научных представлений. В гончарном круге был впервые применен маховик как средство ослабления неравномерности вращения от толчков, получаемых кругом от ног гончара. Первобытный гончар не имел понятия о том, что выравнивающий эффект маховика зависит от его массы и квадрата числа оборотов, но это не мешало ему с успехом применять маховик на практике.

Другим ранним прототипом будущих технологических машин явился вертикальный ткацкий станок (рис. 2-9), в котором была использована сила тяжести, что являлось характерным для многих машин вплоть до XIX в. В этом станке сделан первый шаг от плетения к ткачеству. На одной части исходного продукта труда (ниток) — утке — сконцентрировано все рабочее движение, а все остальные нити — основа — получают нужное положение путем использования тяжести подвешенных камней. Очевидно, что переме-

шение одной нити, намотанной на острую палочку (прототип будущего челнока), упрощает процесс труда по сравнению с плетением, при котором пальцы должны поочередно двигать все нити. Машина *помогает* рабочему и даже частично заменяет его (натягивает нити основы), что приводит к повышению производительности труда.

Особое внимание следует уделить технологической машине первобытного общества, предназначенной для размо-

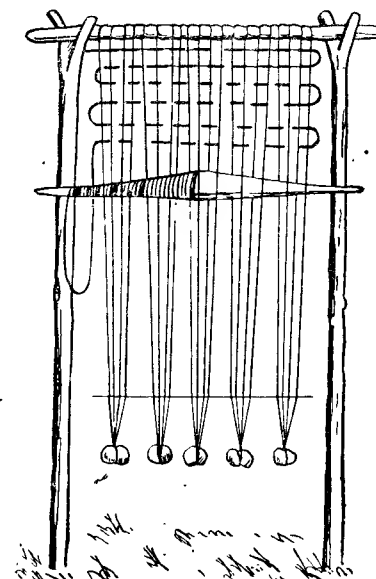


Рис. 2-9. Вертикальный ткацкий станок.

Нити основы натянуты с подвешенными из них камнями, а челнок с намотанной на нем нитью утка вручную протаскивается между нитями основы.

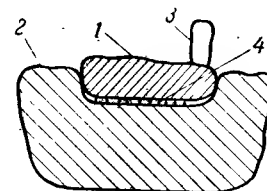


Рис. 2-10. Ручная мельница (зернотерка) с вращающимся жерновом.

1 — вращающийся жернов; 2 — камень с выдолбленным углублением; 3 — рукоятка для вращения жернова; 4 — размалываемое зерно.

ла зерна. Сначала процесс размола зерна обеспечивался возвратно-поступательным движением одного камня по плоской поверхности другого. Низкая производительность подобного устройства определялась медленным движением верхнего камня, ускорить которое представлялось невозможным вследствие проявления инерционных усилий при переменах направления движения камня. Единственным правильным решением являлся переход от возвратно-поступательного движения к вращательному, скорость которого можно было значительно увеличить. Это решение было найдено в результате труда многих поколений в виде вращающегося камня — жернова (рис. 2-10), расположенного в соответствующем углублении неподвижного нижне-

го камня. В подобной мельнице энергетические функции отчетливо отделены от технологических. Для этой технологической машины нужно было однонаправленное вращательное движение по круговой траектории. Поэтому ранняя энергетическая «живая машина» — человек — почти полностью освобождался от выполнения логических и контрольных функций. В основном на его долю приходилась только энергетическая функция, которую с таким же успехом могли вместо человека осуществлять животное или энергия неорганической природы (ветра или водного потока).

Таким образом, в зерновой мельнице сочеталась потребность в передаче энергетической функции машине (поскольку процесс размолотия — энергоемкий процесс) с возможностью осуществления этой передачи (поскольку энергетическая функция здесь совершенно отделялась от технологической), а поэтому в ней отчетливо сложились предпосылки замены человека машиной для выполнения энергетической функции.

Возникновение энергетической техники

В настоящее время потребление энергии для производственных процессов, транспорта, сельского хозяйства и бытовых нужд складывается из двух основных видов: потребление теплоты ($\sim 80\%$) и механической работы ($\sim 20\%$). В первобытном обществе потребность в механической энергии покрывалась исключительно затратами биологической энергии. Самым крупным достижением техники первобытного периода явилось возникновение теплотехники в форме получения и использования огня. Использование огня сразу начало находить себе применение как в быту, так и в производственной деятельности людей. Согревание у пламени костра, варка пищи, лучше усваиваемой организмом, защита от диких зверей обеспечили сохранение и развитие человека.

Однако перечисленные виды раннего бытового использования тепла еще не определили всего значения для людей этого первого заимствования человеком энергии из кладовых природы. В своих взаимоотношениях с природой человек не может получать от природы ничего, кроме того, чем она располагает: *вещества и энергии*. В процессе исторического развития способов заимствования от природы ее вещества и энергии каждый шаг в освоении новых видов вещества создавал условия для освоения новых видов энергии, а применение новых видов энергии да-

вало возможность освоения и новых видов вещества. Так, используя дерево, человек путем трения одного куска дерева о другой начал получать теплоту, которая позволила производить ранее неизвестный ему вид вещества — металл, и т. п. Металл оказал решающее влияние на жизнь первобытного общества. Медное, бронзовое, а затем и железное оружие и орудия (рис. 2-11) сохранили форму и размеры, определяемые ручным трудом, но получили ряд новых качеств, значительно увеличивших их эффективность по сравнению с такими же орудиями из камня.

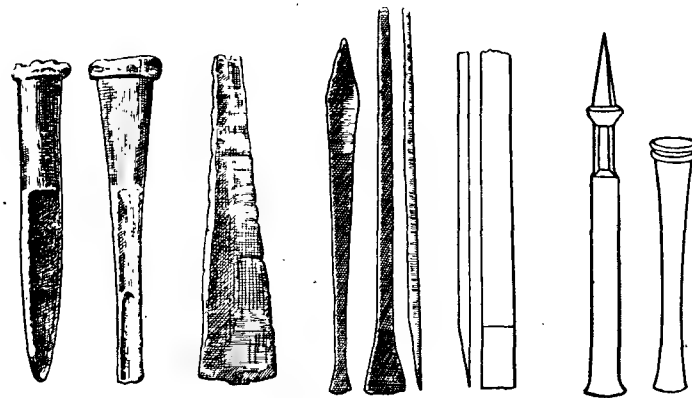


Рис. 2-11. Орудия труда из бронзы.

Технология получения металла поставила ряд сложных задач по организации соответствующих тепловых режимов. Костер, в какой-то степени позволявший получать относительно низкоплавкую бронзу, оказывался совершенно непригодным для выплавки железа из руды. Путем длительного опыта, передавая из поколения в поколение рецептуру, складывающуюся ценой большого труда, первобытные металлурги научились для дутья в плавильных печах использовать воздушные потоки, перемещавшиеся по склонам холмов (рис. 2-12). Зависимость процесса плавки от таких непостоянных факторов, как направление и скорость свободного воздушного потока, привели к решению, заключающему в себе принципиально новое содержание: человек должен осуществлять такое дутье независимо от природы. Легкие человека, позволяющие раздувать огонь, оказались совершенно недостаточными

для воздухоподогрева рудоплавильной печи и были заменены воздуходувными мехами: машине была передана еще одна из трудовых функций человека.

В рудоплавильной печи усовершенствованного типа (рис. 2-13) процесс плавки почти не зависел от при-

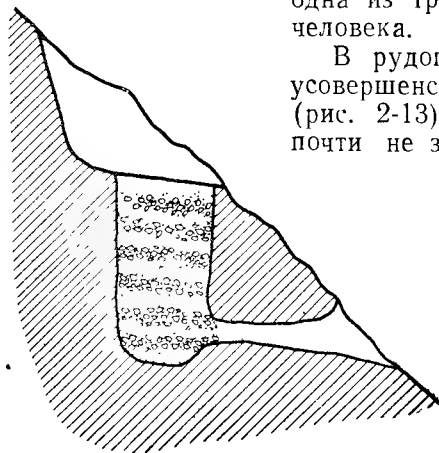


Рис. 2-12. Рудоплавильная печь на склоне горы.

роды, но привод воздуходувных мехов потребовал затраты механической работы, в качестве источника которой человек мог в то время использовать только самого себя. Взаимосвязь производственных процессов привела к тому, что энергоиспользование в одной его форме (тепло)

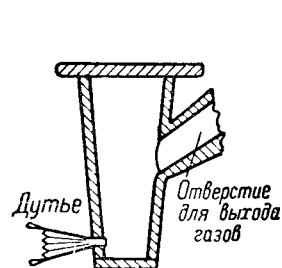


Рис. 2-13. Схема сыродутного горна для получения железа.

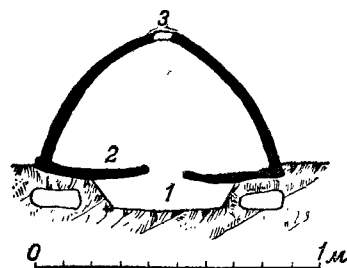


Рис. 2-14. Гончарная печь. 1—место для очага; 2—печной под; 3—отверстие для выхода дыма.

вызвало необходимость применения энергии в другой форме (работа). Рудоплавильная печь, таким образом, явилась первым техническим объектом — потребителем

энергии двух видов. Она же вслед за зерновой мельницей заставила человека обратиться к энергетическим ресурсам неорганической природы.

Стремление наиболее целесообразно использовать тепловые процессы привело к новым конструктивным формам. Так возникли обжигательные печи (рис. 2-14) и нагревательные горны, стали осуществляться выжигание стволов деревьев для получения челнов и выжигание лесных массивов для расчистки земли под посевы. Теплота — первая энергия неорганического мира, покоренная человеком, начала вносить свой вклад в технический прогресс.

2.2. ВОЗНИКНОВЕНИЕ РАБОВЛАДЕЛЬЧЕСКОГО СТРОЯ

В течение многих тысячелетий, прошедших от изготовления человеком простейших кремневых ударников до овладения металлургией железа, шел рост производительных сил первобытного общества, наложивший свой отпечаток на его структуру.

В период присвоения готовых продуктов природы, когда общество располагало крайне простым ассортиментом орудий, не было никаких причин для выделения одних людей от других по каким-либо признакам, кроме опыта старейших. Наоборот, отсутствие разнообразия в орудиях и методах их применения, с одной стороны, уравнивало членов общества, а с другой — малая эффективность орудий вызывала необходимость действовать сообща, коллективно.

Когда общество начало переходить от присвоения продуктов природы к воздействию на природу с целью увеличения ее продуктивности, оказалось, что людям, жившим в разных климатических и географических условиях, сама природа диктовала наиболее благоприятный вид воздействия на нее с целью либо увеличения ее продуктивности по урожайности зерновых и огородных культур, либо увеличения поголовья скота. Под влиянием внешних природных факторов произошел исторический процесс *первого крупного общественного разделения труда: отделение земледельческих племен от пастушеских*. Различие материальных благ, получаемых в результате воздействия на природу со стороны пастушеских и земледельческих племен, вызвало обмен продуктами труда сначала непосредственный, а затем при помощи условного эквивалента потребительской стоимости — денег.

Ранняя специализация, вызванная разделением труда, отразилась на специализации (дифференциации) орудий труда. Воздействие на природу в большей степени, чем присвоение готовых ее продуктов, потребовало значительного количества и разнообразия орудий, больше металла, более сложных методов его обработки. Заниматься изготовлением орудий каждому для своего индивидуального пользования, уделяя этому время, оставшееся от земледелия и скотоводства, более не представлялось возможным. Производство орудий и некоторых продуктов потребления — посуды, обуви, украшений и т. п. — требовало определенных навыков и большой затраты времени и могло быть обеспечено только деятельностью людей, специально посвятивших себя ремеслам. Эти люди не занимались охотой, земледелием или животноводством, а изготавливали орудия и оружие для охотников, земледельцев и пастухов; эти предметы они должны были обменивать на продукты питания.

Так, сначала из среды земледельцев, а позднее и из среды пастушеских племен выделились ремесленники, начавшие осуществлять третий вид деятельности человека — *ремесленное производство*. Выделение ремесленников явилось *вторым крупным общественным разделением труда*.

Второе общественное разделение труда способствовало дальнейшей дифференциации производственной деятельности людей и возникновению профессий. Вместе с этим усиливался обмен продуктами труда, все более принимавший формы торговли. Увеличение объема торговли и дальности перевозок привело к появлению людей, посвятивших себя этой деятельности, — купцов.

Главное последствие разделения труда лежит в специализации людей, орудий, технологических приемов. Специализация — один из основных способов повышения производительности труда. Изготавливая изо дня в день, из года в год один и тот же продукт, передавая свой опыт от отца к сыну, ремесленники неизмеримо лучше овладевали техникой производства этого продукта, чем люди, переходящие от одного дела к другому. Они усовершенствовали и специализировали инструменты и приемы; увеличилась производительность труда также и в животноводстве и земледелии, поскольку эти области стали снабжаться ремесленниками более качественными орудиями труда. Так, возросла ценность труда, возросла и ценность его носителя — человека прежде всего как производителя матери-

альных благ. Поэтому употребление плененных врагов в пищу стало заменяться превращением их в рабов. Так возникла первая форма эксплуатации человека человеком, выражавшаяся в прямом принуждении к труду силой оружия и присвоении продукта труда человека, ставшего рабом.

Возможность производства ценностей в количестве, превышающем их потребление на непосредственные нужды общества, явилась предпосылкой к имущественному неравенству, к неодинаковому присвоению продукта общественного труда. В связи с этим древняя родовая община начинает распадаться; в качестве экономических ячеек общества выдвигаются семьи, имущественное неравенство которых все возрастает за счет эксплуатации рабского труда. Общество становится классовым. Возникновение классов решающим образом изменило условия развития техники в рабовладельческом обществе по сравнению с первобытно-общинным. Прежде всего это изменение отразилось на характере проявления движущих сил развития техники. В условиях первобытного общества потребность человека в материальных благах принуждала его к личной активной деятельности, направленной на получение этих благ. Общность характера потребностей всех членов общества при слабости отдельных членов общества побуждала людей к совместной деятельности.

В условиях рабовладельческого общества личные потребности рабов — производителей материальных благ — в пище, одежде, жилище, тепле и т. п. не удовлетворялись их непосредственным обращением к природе. Предельно низкий минимум необходимого они получали от рабовладельца в виде пищи, одежды и крова, представлявших лишь малую долю производимых ими материальных ценностей. Большая доля этих ценностей, присваиваемая рабовладельцем, превышала самый высокий уровень его личных биологических потребностей и вызывала новые формы потребностей. Искусство, для которого первобытный человек с трудом изыскивал время, почти целиком затрачиваемое на борьбу за существование, теперь получило возможность высокого расцвета и совершенствования, но оно становилось достоянием только рабовладельческой верхушки. На долю рабов доставались не только тяжелая жизнь в условиях изнурительного труда, но и тяготы по содержанию государственного аппарата и армии, пополнявшей контингенты рабов. Тем не менее возможности более глубокого

разделения труда и его частичной специализации создавали в рабовладельческом обществе условия для некоторого подъема производительных сил, невозможного в условиях первобытного общества. Энгельс писал, что «...Только рабство сделало возможным в более крупном масштабе разделение труда между земледелием и промышленностью и таким путем создало условия для расцвета культуры древнего мира»¹.

Крупные рабовладельческие государства существовали на территориях: Азии—Урарту, Хорезм, Ассирия, Вавилония, Персия, Финикия, Китай, Индия; Европы—Греция, Рим; Африки—Египет, Карфаген.

Все эти государства внесли свою долю в прогресс техники и культуры, в развитие производительных сил общества, характерные черты которого рассмотрены ниже.

2-3. РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ПРИ РАБОВЛАДЕЛЬЧЕСКОМ СТРОЕ

Развитие орудий труда

Производство рабовладельческого периода оставалось ручным. Ручными были и орудия труда, а поскольку они по своим размерам, весу, форме соответствовали усилию и руке работника, не произошло существенных изменений и в элементах этих орудий. Основное изменение произошло в материале орудий труда; главным материалом становится железо, а позднее—углеродистая сталь. Осваиваются простейшие приемы термической обработки: закалка, методы поверхностной цементации железа.

В рабовладельческий период охота утратила свое прежнее значение и, несмотря на усовершенствованное оружие, заняла подсобную роль в системе производительных сил общества. Развилась рыбная ловля, чему способствовали разработанный метод постройки судов из отдельных досок и улучшение рыболовных снастей.

Методы воздействия на природу получили значительное развитие. Увеличился ассортимент культивируемых растений: кроме проса, унаследованного от более древних времен, культивировались пшеница, рис, ячмень, масличные и волокнистые культуры. Основным орудием стал плуг, сначала—деревянный, позднее—с лемехом, обшитым железом. В качестве тягловой силы в течение многих веков

использовались рабы. Применение для пахоты домашних животных, преимущественно волов, было относительно редким: в условиях дешевого рабского труда это было невыгодно.

Развитие производства шло как за счет увеличения числа ремесленников, так и за счет выделения более узких специальностей и профессий. Кузнецы и медники, гончары и шорники, оружейники и мебельщики и др. вовлекли в производство значительное число людей, совершенствовавших инструменты и рабочие приемы своего ремесла.

Сохранившиеся орудия, их описания и рисунки показывают, что в рабовладельческий период возникли и применялись: напильники, сверла, резцы, ножницы, ланцеты, пилы, рубанки, коловороты, чеканы и другие ручные инструменты. Повысилась точность обработки, в связи с чем стали применяться измерительные приборы и инструменты: отвесы, угольники, циркули, линейки.

Развитие орудий труда в рабовладельческом обществе протекало в противоречивых условиях. Раб, являвшийся основным производителем материальных ценностей, не был заинтересован в повышении производительности своего труда, не стремился совершенствовать его орудия. Поэтому в главном источнике материальных благ рабовладельческого общества—земледелии и животноводстве, где рабы составляли подавляющее большинство рабочей силы, производительность труда была низкой, рост совершенства орудий труда—незначительным. В области ремесленного производства, направленного преимущественно не удовлетворение запросов рабовладельческого меньшинства, постепенно складывалась прослойка свободных ремесленников и происходил процесс углублявшегося разделения труда, а вместе с ним совершенствование орудий и технологических приемов. Однако в этой области значительная доля продукции не являлась предметом широкого потребления, как, например, ювелирные изделия, украшения и утварь дворцов и храмов и т. п.

Значительно большее развитие произошло в области сложных орудий, из которых складывались машины рабовладельческого периода.

Развитие машин

В рабовладельческом обществе наибольшее развитие получили транспортно-подъемные машины, так как постройка укреплений, дворцов, общественных зданий, храмов, гробниц, дорог требовала перемещения большого ко-

¹ Ф. Энгельс, Анти-Дюринг, 1957, стр. 169.

личества строительных материалов и подъема значительных тяжестей.

Применение рычагов и катков для транспорта тяжелых объектов (рис. 2-15) способствовало созданию колеса, явившегося ценным вкладом в технику, и возникновению комбинированных и усложненных применений принципа рычага в системах с вращательным движением: воротах, блоках, полиспастах (рис. 2-16). Из комбинации рычага с колесом позднее возникли зубчатые колеса. Для осуществле-

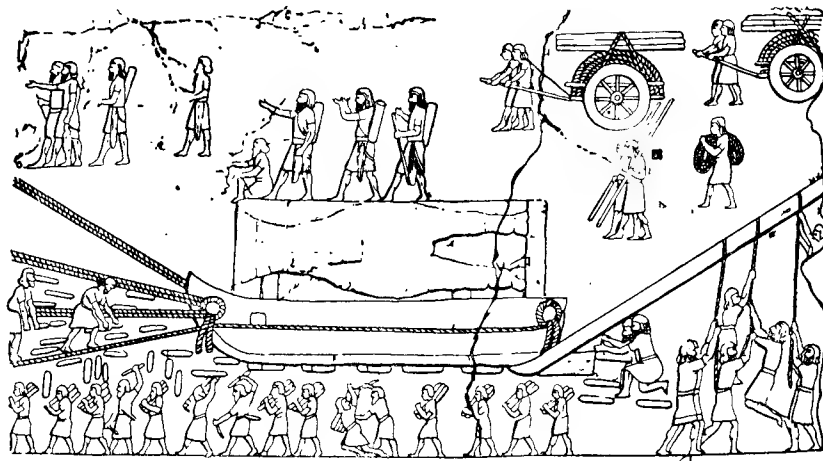


Рис. 2-15. Перевозка статуи с использованием рычагов и катков (ассирийский барельеф).

ния больших передаточных чисел были найдены самотормозящиеся передаточные пары: винт и гайка, червяк и червячное колесо. Таким образом, развитие подъемных и транспортирующих машин обусловило возникновение большинства ныне применявшихся механизмов передачи и трансформации механической работы. Широкое использование подъемных устройств, начиная с простых рычагов и кончая сложными подъемными механизмами, вызвало попытку дать первое определение машины [римский зодчий Витрувий в книге «Десять книг об архитектуре» (16—13 гг. до н. э.)]. Это определение в соответствии с современным ему уровнем развития машин, знавшим только транспортные машины, сводилось к тому, что «... машина есть материальная совокупность деревянных частей, преимущественно приспособленная к передвижению тяжестей».

Возникновение и рост городов вызвали задачу водоснабжения. Эта задача решалась обычно путем перемещения воды самотеком (акведуки) от высоколежащих водоемов. Поскольку в природе такие возможности довольно редки, то для целей городского и сельскохозяйственного (полив посевов) водоснабжения нужно было поднимать воду в больших количествах. Эта задача, крайне обострявшаяся в отдельные периоды, в значительной степени способствовала техническому прогрессу. Особенность водоподъема состоит в большой его энергоемкости, а поэтому нужно было раз-

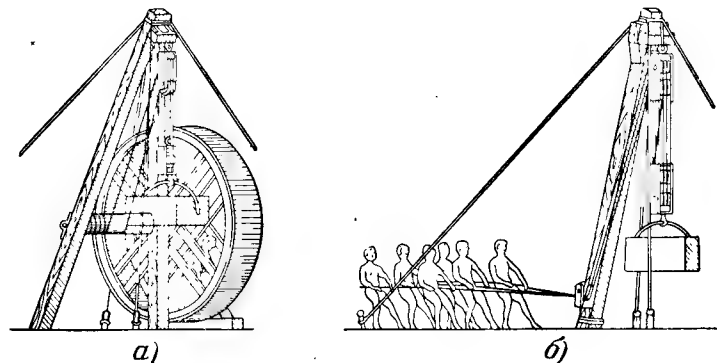


Рис. 2-16. Подъемные машины.
а — со ступальным колесом; б — с полиспастом.

работать не только транспортирующую часть водоподъемной установки (транспортную машину), но и энергетическую машину (двигатель) для привода в движение первой. В течение длительного времени энергетическая часть задачи решалась применением биологической энергии рабов: водоподъемное колесо и водоподъемный винт приводились в действие энергией рабов.

Водоподъемная машина, потребляющая энергию, могла быть легко использована в обратном направлении, путем превращения в машину энергетическую. Действительно, в рабовладельческий период была известна возможность применения водяных колес для привода зерновых мельниц, но строились они исключительно редко, поскольку использование биологической энергии рабов обходилось дешевле, чем постройка и эксплуатация гидроустановок.

Устройства, показанные на рис. 2-17 и 2-18, являются первой обратимой машиной, развившейся в наши дни в пропеллерные (винтовые) агрегаты, которые, не отличаясь

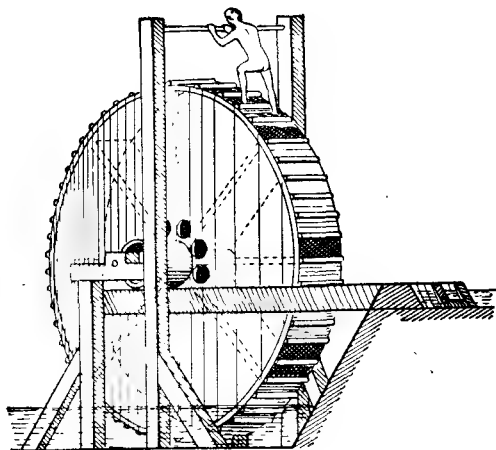


Рис. 2-17. Водоподъемное колесо, приводимое в движение человеком.

Через отверстия на ободе колеса вода (по мере их погружения) попадает во внутренние отсеки, а затем переливается к центру и через специальные круглые отверстия выливается в выпускной желоб.

друг от друга по принципу их конструктивного оформления, могут выполнять две взаимно обратные функции: давать механическую работу за счет падения воды (гидротурбина) или поднимать воду за счет затраты механической работы (турбонасос).

Был разработан и пожарный насос (рис. 2-19). В этой машине, построенной греком Ктесбием, представлена исключительно жизненная техническая конструкция в виде

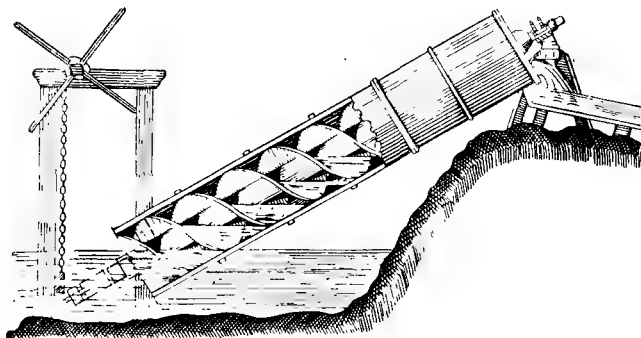


Рис. 2-18. Архимедов водоподъемный винт.

цилиндра с поршнем, позволяющая создавать переменный объем в замкнутой полости.

С возникновением классового общества на развитие техники начало оказывать сохранившееся и в наши дни влияние производства различных объектов военного назначения. В рабовладельческий период строители военных кораблей, сложных метательных и стенобитных машин, разнообразных средств нападения и защиты использовали самые прогрессивные достижения техники и внесли в ее развитие много нового.

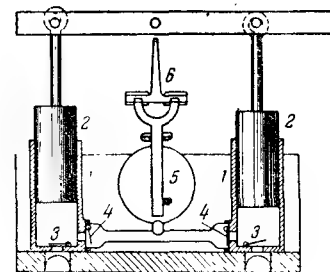


Рис. 2-19. Водоподъемный насос Ктесбия.

1 — цилиндры; 2 — поршни; 3 — всасывающие клапаны; 4 — нагнетательные клапаны; 5 — уравнительный воздушный колпак; 6 — насадка для направления струи.

Энергетических машин рабовладельческое общество не создало, поскольку в условиях дешевого рабского труда не было стимула к использованию энергии неорганической природы.

Во II в. до н. э. Героном Александрийским был построен прибор «Эолипил» (рис. 2-20), в котором наглядно демонстрировалось реактивное действие струй пара, выходя-

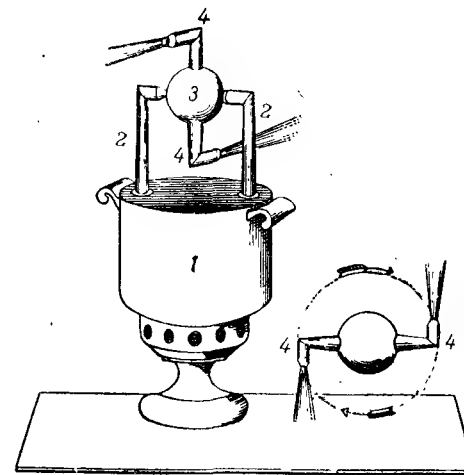


Рис. 2-20. Эолипил Герона.

1 — сосуд для парообразования; 2 — паропроводящие трубки; 3 — шар; 4 — выходящие трубки.

щего из загнутых трубок, в результате которого шар вращается около горизонтальной оси (этот прибор иногда ошибочно рассматривается как первая турбина, т. е. как двигатель).

К числу технологических машин, получивших распространение в этот период, следует отнести ткацкий станок, который продолжал оставаться ручным орудием и только частично заменял выполнение технологической функции ткача, вручную протаскивавшего челнок.

Возникновение новых отраслей техники

В период рабовладения возникли и получили значительное развитие некоторые новые отрасли техники, в частности строительная техника. В некоторых рабовладельческих государствах земледелие могло успешно развиваться только при искусственном обводнении земель, для чего сооружались ирригационные системы. Так, в Египте на р. Ниле была возведена сложная Асуанская система с плотинами, водохранилищами, водоотводными каналами и особыми устройствами для регулирования. В Китае в VI в. до н. э. рр. Хуанхэ и Янцзы были соединены «Великим каналом» протяженностью свыше 1000 км. На территории современной Армении сохранились остатки гидротехнических сооружений древнего рабовладельческого государства Урарту. Памятники архитектуры рабовладельческого периода являются замечательными образцами высокого мастерства и искусства, поражающего законченностью своих архитектурных форм. Древним зодчим Индии, Хорезма, Урарту, Китая, Рима, Греции, Египта удалось найти гармонические пропорции отдельных частей сооружений и создать сложные архитектурные ансамбли.

В рабовладельческий период началось строительство дорог как надежного средства связи отдельных частей государства с его административными и торговыми центрами. Реки, пересекавшие трассы дорог, перекрывались мостами, основой которых служили каменные арки. Прочность мостов была такова, что некоторые из них сохранились до настоящего времени.

В качестве средства быстрой связи были разработаны различные системы оптического телеграфа, позволявшего вспышками факелов передавать условные сигналы.

Развитие торговли и потребности военного дела привели к возникновению водного транспорта. Освоенный в период первобытно-общинного строя способ изготовления судов из целых стволов деревьев путем выжигания или вы-

далбливания не позволял строить суда значительной вместимости. Суда стали строить из отдельных элементов, вследствие чего размеры судна перестали определяться величиной древесного ствола. Наборный остов судна (из продольного составного бруса — киля и поперечных «ребер» — шпангоутов) обшивался деревянными досками; щели конопатились паклей, и поверхность погруженной части судна покрывалась смолой для предохранения древесины.

Основным двигателем судов являлись гребцы — рабы. Ветер использовался только попутный и небольшой, не угрожающий целости непрочных судов. Стремление увеличить мощность живого двигателя судна вынуждало распределять гребцов вдоль борта в два или даже три яруса. При этом гребцы верхнего яруса двигали весьма тяжелые и длинные весла, так что приходилось ставить несколько рабов на одно весло. В конечном счете вес и объем «живого двигателя» приближались к весу и объему судна в целом и, таким образом, ставили предел размерам судна.

Возникновение естествознания

Ф. Энгельс характеризовал рабовладельческую эпоху как период, в течение которого человечество «училось мыслить». В этом определении Энгельса заключен глубокий смысл. Человек не сразу научился познавать окружающий мир. Процесс познания имеет свои ступени развития. «От живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике» — таков диалектический путь познания истины, познания объективной реальности», учит Ленин¹. Живое созерцание воспринимает действительную реальность в ее конкретной форме, и в ранний период своего развития человек еще не умел усматривать за конкретной формой созерцаемых предметов и явлений присущих им взаимосвязей. Выделение абстрактного общего из конкретных частных форм, широкое образование понятий начали проявляться и достигли большой широты и четкости в рабовладельческий период: человек научился думать. Умение абстрактно мыслить, возникшее и сложившееся путем тысячелетнего опыта, наблюдений и трудовой деятельности, дало возможность заглянуть в скрытый за внешними конкретными формами механизм явлений и процессов природы, найти закономерности их причинных взаимосвязей. «Умение думать», образование абстрактных понятий как следующий за созерцанием шаг в развитии познания создавал почву для возможности становления науки. Потреб-

¹ В. И. Ленин, Соч. изд. 4-е, т. 38, стр. 161.

ность в ней и прежде всего в естествознании и Математике, изучающей количественные соотношения и пространственные формы, удовлетворилась деятельностью людей, свободных от физического труда.

Необходимость счета и земельных измерений вызвали возникновение и развитие математики: были установлены основы геометрии, положено начало развитию теории чисел, разработаны правила составления и решения квадратных уравнений, были открыты иррациональные числа, изучены конические сечения и т. п.

Мореплавание и нужда в измерении времени вызвали возникновение и развитие астрономии, ограничившейся в рабовладельческий период становлением в трудах Гиппарха и Птолемея геоцентрической системы мироздания.

Архитектура, строительство сложных сооружений, кораблестроение сделали необходимым решение ряда задач статики сооружений и механики твердых и жидких тел. В этой области обобщающими работами явились труды Архимеда, разработавшего теорию рычага и открывшего закон плавания тел.

Таким образом, в условиях рабовладельческого общества возникла потребность в научных обобщениях и оказалась возможность удовлетворения этих потребностей. Так возникало естествознание. Однако возможности его развития ограничивались теми требованиями, которые предъявлялись к естествознанию со стороны производства. Ограничивалось развитие естествознания и по методу научного исследования. «Научившись» думать, т. е. все шире и глубже применять абстрактное мышление, многие ученые древнего мира переоценили его свойства, оторвали абстрактные категории мышления от их первоисточника и сочли себя способными ставить и решать любые задачи вне связи с объективным материальным миром. Так возник источник идеалистического мировоззрения. Ученые, остававшиеся на материалистических позициях, также не были свободны от рабовладельческой идеологии, считавшей физический труд уделом рабов. Отсюда недооценка опыта, поскольку в нем заключены элементы физического труда.

Ученые древнего мира, исследуя явления и процессы природы, не обращались за ответами на возникавшие вопросы непосредственно к исследуемым явлениям и процессам путем постановки эксперимента, а ограничивались лишь логическими построениями. Поэтому наука рабовладельческого периода была умозрительной.

2.4. РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ПРИ ФЕОДАЛЬНОМ СТРОЕ

Кризис в развитии
техники
рабовладельческого
общества

Для оценки громадных достижений техники рабовладельческого периода в области строительства величественных сооружений может показаться случайным исторический факт падения могущественных рабовладельческих государств под натиском «диких» племен, находившихся на гораздо более низкой ступени развития производительных сил. Однако падение рабовладельческого строя было закономерно подготовлено историческим ходом его развития, обострением присущих ему противоречий, перерастанием этих противоречий в затяжной кризис, расшатавший вконец его экономическую базу. Действительно, поражающие нас образцы достижений строительной техники, значительное развитие и специализация ремесел в рабовладельческий период проявлялись в областях производства, не укреплявших материальную основу общества, а обслуживавших потребности узкой правящей верхушки. Если для производства предметов роскоши и комфорта рабовладельцев ремесленники специализировались и улучшали орудия труда, то в области производства материальных благ, определяющих условия жизни общества в целом: пищи и предметов широкого потребления, совершенствование орудий труда было крайне незначительным. В наиболее трудоемкие работы по обработке земли под посев, по уборке урожая техника внесла мало усовершенствований. Производитель материальных ценностей — раб — совершенно не был заинтересован в повышении производительности своего труда, поскольку это повышение не могло принести ему никаких благ или облегчения его положения. Раб ненавидел свой подневольный труд, ненавидел орудия этого труда и ломал их при любой возможности остаться безнаказанным. Поэтому ему доверилось самое грубое, самое примитивное орудие, а увеличение производительности достигалось за счет удлинения рабочего дня и изнуряющей интенсификации труда под ударами бичей надсмотрщиков.

В таких условиях рабовладельческие государства в конечный период своего исторического развития оказались чрезвычайно ослабленными внутренними противоречиями, экономически неустойчивыми и неспособными противостоять натиску возникавшего нового общества с более прогрессивными отношениями между производительными силами и производственными отношениями. Рабовладельче-

ский способ производства был заменен феодальным, заключавшим в себе возможности для развития производительных сил, поскольку основной производитель материальных благ феодального общества — крепостной — в отличие от раба был заинтересован в повышении производительности своего труда.

В многовековой истории развития феодального общества (с конца V по XVIII в.) можно отметить три периода с характерным для каждого из них уровнем производительных сил и техники.

Первый период (с конца V по первую половину XI в.), получивший наименование раннего средневековья, характеризуется незначительным разделением труда в системе натурального хозяйства. Все потребные общественным единицам (усадьбам феодалов, монастырям, селам) продукты производились внутри этих единиц, а товарообмен носил случайный характер и определялся местными особенностями, обуславливавшими характер производимых продуктов.

Второй период (со второй половины XI до конца XVI в.), получивший наименование позднего средневековья характеризуется ростом городов, формированием национальных государств, увеличением различий между городом и деревней, организацией обмена продукции сельского хозяйства на продукцию городского ремесленного производства. Ремесленники, пополняемые за счет крепостных, переведенных на денежную повинность, численно возрастают и специализируются по производимому продукту (суконщики, башмачники, оружейники, портные и т. п.).

Специалисты ремесленники объединялись организационно в цехи, складывавшиеся из отдельных производственных единиц, возглавлявшихся и руководимых специалистом высшей квалификации — мастером, являвшимся владельцем орудий производства данной ремесленной мастерской. Работавшие под руководством мастера подмастерья отличались от мастера степенью овладения профессией. Кроме них, в производственном процессе участвовали ученики, которые в течение многих лет должны были обучаться ремеслу и зачастую выполняли в ремесленных мастерских работу живого двигателя при несложных транспортных или технологических машинах — воздухоудках, дробилках, мешалках, каландрах и т. п.

Третий период (с конца XVI до последней трети XVIII в.), получивший наименование периода первоначаль-

ного накопления капитала, характеризуется возникновением и развитием в недрах феодального общества капиталистических отношений. Географические открытия расширили рынок сбыта и источники сырья. Возникла острая потребность во всемерном увеличении выпуска промышленных товаров для широко развившейся торговли. Увеличение промышленной продукции могло, вообще говоря, осуществляться за счет вовлечения в сферу промышленного производства большего числа работников и повышения производительности труда. При цеховом способе производства рост производительности ручного труда был незначительным, а привлечение новых работников задерживалось крайне длительным сроком овладения профессией.

Решение было найдено в применении *широкого разделения труда* между участниками производственного процесса; так, например, в каретном производстве отдельный работник специализировался на изготовлении какой-либо части экипажа: колесных спиц, втулок, осей, рессор, кузова и т. д. При этом работник, во-первых, мог в более короткий срок овладеть приемами изготовления отдельной детали, а, во-вторых, мог работать более производительнее, приспособив себя самого и инструмент к более узкому числу производственных операций. Еще более значительный эффект могло дать разделение труда на отдельные операции. Так, например, при изготовлении гвоздей процесс производства, состоящий из ряда последовательных операций, поручался нескольким работникам, причем на долю каждого из них падала одна только операция: протяжка проволоки, резка проволоки, высадка головки, образование острия, отделка. Такое сужение производственных функций рабочего включает в себе три возможности: быстрое обучение рабочего, повышение производительности труда и возможность *передачи упрощенной рабочей операции машине*. Так, широкое пооперационное разделение труда подготавливает предпосылки к возникновению технологических машин более высокого класса, не только помогающих рабочему, но и полностью заменяющих его искусные руки.

Быстрая подготовка рабочего при глубоком разделении труда уменьшает потребность в ученике как будущем рабочем. Функция двигателя была передана устройству, работающему за счет энергии неорганической природы, — водяному колесу. В соответствии с увеличением мощности

двигателя увеличиваются и простейшие транспортные и технологические машины: воздуходувные мехи, толчеи, дробилки и т. п., работающие теперь на большой коллектив рабочих.

Так сложилась новая форма промышленного производства, получившая наименование *мануфактуры*.

Мануфактурное производство оставалось ручным, но в нем получили применение энергетические машины, заменившие живой двигатель, транспортирующие машины (воздуходувки, насосы). Технологические машины либо только частично выполняли функции рабочего (прялка, ткацкий станок), либо производили промежуточный продукт (дробилки, мешалки, краскотерки и т. п.). Наиболее ранним видом технологической машины, дающей продукцию установленных формы и размеров без участия рук рабочего, явилась лесопильная рама, распиливающая бревна на доски. Но и эта машина готовила не продукт потребления, а материал для дальнейшей обработки.

Таким образом, в феодальный период заметное развитие получили технологические машины 1-го класса, сложившиеся в результате роста ручных орудий при передаче функции двигателя от человека водяному колесу.

Мануфактурное производство является переходным видом, в котором сложились капиталистическая организация труда, капиталистические производственные отношения, возник новый общественный класс — пролетариат, возникли предпосылки к переходу производства на новую стадию развития, к машинному производству.

Развитие орудий труда в феодальный период

В развитии ручных орудий труда в феодальный период был достигнут значительный прогресс, который прежде всего был обусловлен применением металла более высокого качества и более совершенными методами его термической обработки. Значительно вырос ассортимент ручных орудий. Сложились комплекты ручных орудий (инструментов) применительно к той или иной профессии: столярные, плотничные, швейные, слесарные и т. п. Начался процесс возникновения новых видов транспортных и первых энергетических машин; начали складываться условия для становления технологических машин 2-го и 3-го классов, полностью заменяющих искусство, квалификацию и тренированные руки рабочего.

Транспортные машины получили в феодальный период значительное развитие. Подъемные краны (рис. 2-21) ста-

ли обслуживать достаточно широкую площадь вокруг крана путем поворота стрелы и движения по ней тележки. Разрабатываются конструкции специализированных подъемных кранов: для подъема сыпучих тел, для расчистки дна гаваней и др.

В отличие от рабовладельческого периода, когда в качестве универсальной энергетической «машины» использовался только раб, теперь все чаще намечаются тенденции

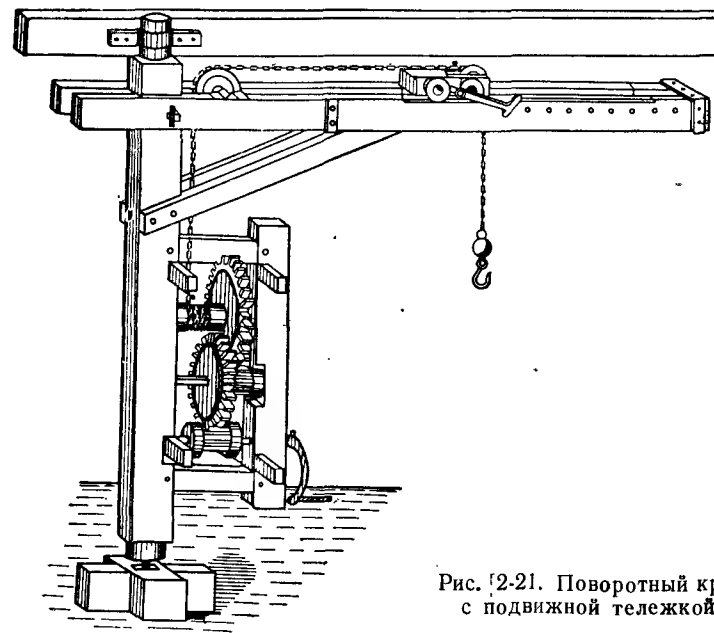


Рис. 2-21. Поворотный кран с подвижной тележкой.

привода подъемных устройств энергией животных или неорганической природы. На рис. 2-22 показан рудничный подъемник с конным приводом и фрикционным тормозным устройством, управляемым рабочим вручную. На рис. 2-23 показано использование ветрового двигателя для подъема мешков с зерном. Там, где представлялось возможным, для приведения в действие подъемных устройств привлекалась энергия водных потоков.

Значительное развитие получили водоподъемные машины. Откачивание воды из глубоких рудников и шахт производилось насосными установками, состоявшими из нескольких поршневых насосов (рис. 2-24) для ступенчатого подъема воды, чтобы избежать большого давления в не-

прочных деревянных трубах при одноступенчатом подъеме на большую высоту. Такие насосные установки приводились в действие лошадьми или от водяных колес. Помимо поршневых насосов, применялись ковшовые элеваторы, черпачковые машины, четковые, в которых подъем воды осуше-

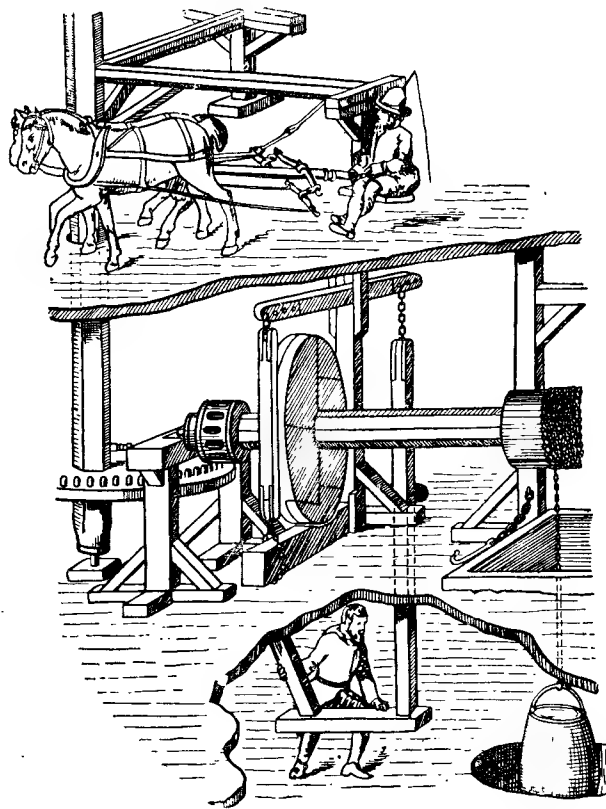


Рис. 2-22. Водоподъемник с конным приводом и фрикционным тормозом.

ствлялся движущейся по вертикальной трубе цепочкой из кожаных шаров-поршней.

Необходимость увеличения количества поднимаемой воды и высоты подъема оказала решительное влияние на развитие энергетики, остро поставила вопрос о мощном двигателе для водоподъемных устройств и привела впоследствии к возникновению парового двигателя.

Развитие технологических машин шло преимущественно по линии совершенствования машин 1-го класса, главным образом по пути увеличения числа машин и их укрупнения. С объединением ремесленников в артели, ростом цеховых производственных единиц и особенно развитием ману-

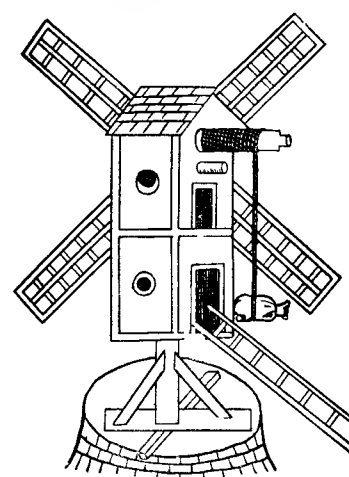


Рис. 2-23. Ветровая мельница с подъемником.

фактурного производства различные простые и сложные ручные орудия, приводившиеся в действие учеником или подмастерьем (песты, дробилки, молоты, терки, насосы и т. п.), выросли в крупные машины, сохранившие те же названия, но требовавшие более мощного двигателя.

На рис. 2-25 показан групповой привод от одного вала к чанам для размола тряпья, на рис. 2-26 — привод от водяного колеса к двум воздуходушным мехам, на рис. 2-27 — привод к бегуну дробильной мельницы. Подобных примеров можно привести множество, и все они свидетельствуют об одном: развитие производства привело к увеличению числа технологических машин 1-го класса, к увеличению их

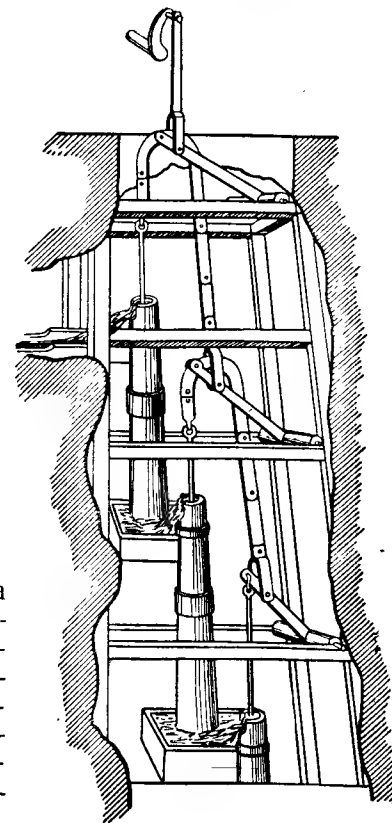


Рис. 2-24. Группа последовательно действующих насосов для откачивания воды из рудников.

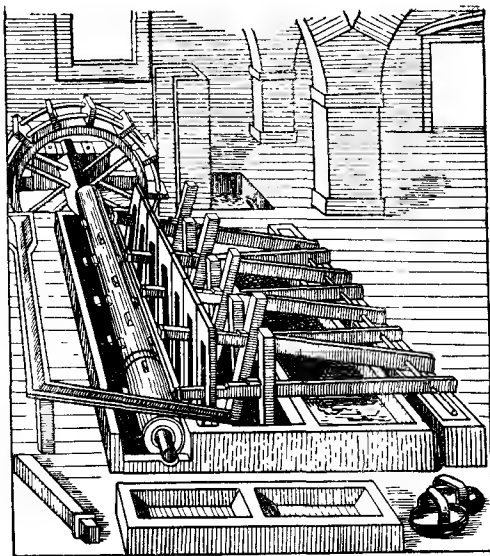


Рис. 2-25. Привод от одного водяного колеса через кулачковый вал к семи чанам для размола тряпья (производство бумаги).

размеров, к росту числа действовавших в них рабочих органов. «Увеличение размеров рабочей машины, — писал Маркс, — и количества ее одновременно действующих ору-

дий требует более крупного двигательного механизма, а этот механизм нуждается в более мощной двигательной силе»¹.

Таким образом, первая линия развития технологических машин из ручных орудий путем их укрупнения ставила вопрос о привлечении энергии неорганической природы.

Рис. 2-26. Кулачковый привод от водяного колеса к двум воздушным мехам для получения непрерывного дутья.

В развитии технологических машин 2-го и 3-го классов складывались предпосылки и возможности последующей полной, а не только частичной замены труда рабочего

¹ К. Маркс, Капитал, т. I, 1955, стр. 382.

машиной. Такая подготовка перехода к машинной технике в ряде случаев доходила до того, что оставалось передать машине последнюю, иногда достаточно несложную операцию ручного труда. Так, например, предшественником ткачества было плетение. Плетение корзин, циновок, головных уборов из стеблей растений разных видов производилось без машин и орудий, исключительного за счет искусной ра-

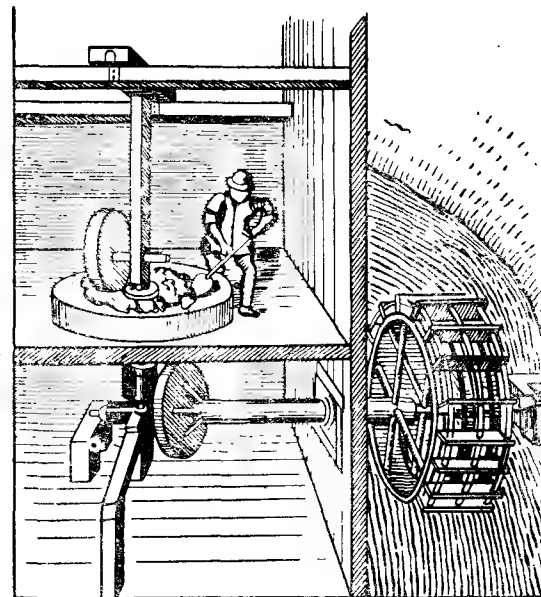


Рис. 2-27. Дробильный «бегун» с приводом от водяного колеса.

боты пальцев работника. Затем возникло первое приспособление, получившее название простейшего вертикального ткацкого станка, хотя в нем (см. рис. 2-9) по существу можно видеть то же плетение, но только в известной степени организованное путем фиксированного положения и натяжения нитей основы. Отделение нитей основы от нитей утка — вот первый шаг от плетения к ткачеству. Рабовладельческий период принес следующий шаг в усовершенствовании технологического процесса ткачества: четные нити основы периодически изменяли свое положение по отношению к нечетным, что позволило

челноку перемещаться по прямой¹. В феодальный период в ткацком станке не только упорядочено было движение нитей основы и обеспечены выравнивание и нажим протянутой нити утка после каждого хода челнока, но и использованы были ноги рабочего для привода устройства, перемещающего нити основы. Теперь ноги

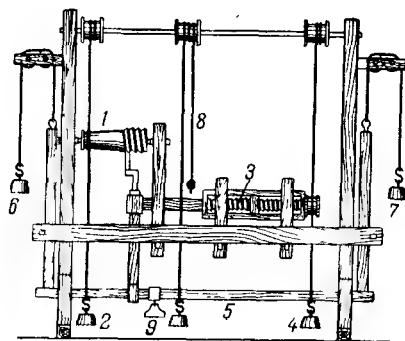


Рис. 2-28. Схема токарного станка с горизонтальной и вертикальной подачами резца и вращением обрабатываемого предмета под действием силы тяжести.

1 — обрабатываемая деталь, работающая при опускании груза 2; 3 — ходовой винт, приводимый в движение грузом 4; 5 — подножка для нажима резца на обрабатываемую деталь, перемещающаяся при помощи грузов 6 и 7; 8 — шнур для подъема грузов; 9 — скоба для опускания подножки и подъема грузов 6 и 7.

человека выполняли простейшую энергетическую функцию двигателя, и вполне можно было заменить их машиной. Руки человека, движущие челнок, выполняли технологическую функцию, но настолько упрощенную и монотонную, что и ее можно было передать машине.

Приведенный пример показывает, как процесс развития технологической машины постепенно упрощал операции работника, создавая возможность перехода к полной замене его труда работой машины.

Кроме совершенствования старых технологических машин и под-

¹ Следует отметить, что известные чешские путешественники Зикмунд и Ганзелка наблюдали разделение четных и нечетных нитей основы у современных племен Южной Америки, живущих в условиях общинного строя.

перехода к машинному производству, когда технологическая машина приняла на себя все технологические функции рабочего, оставив за ним выполнение только контрольных и логических функций.

Характерным примером замены технологических функций работника машиной 2-го класса, воспринявшей инструмент из рук рабочего, может служить сложившееся в фео-

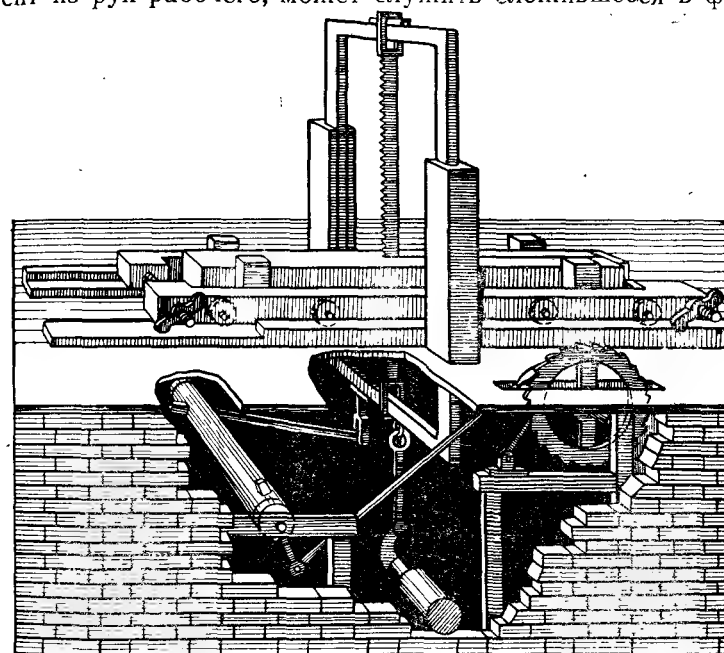


Рис. 2-29. Пильная мельница.

Вращение вала от водяного колеса передается раме, несущей пилу (или ряд пил), а через храповое колесо осуществляется перемещение тележки с бревном.

дальний период устройство для распиловки бревен на доски (рис. 2-29).

Станок Леонардо да Винчи для насечки напильников (рис. 2-30) может также служить прекрасным примером технологической машины 2-го класса, воспринявшей из искусных рук человека молоток и зубило и способной выполнять ту же работу и быстрее и лучше. Но напильники тогда не были товаром широкого потребления, изготовлялись самими мастерами, и поэтому станок Леонардо да Винчи не получил распространения.

Длительным был и процесс подготовки токарного станка к переходу от частичной к полной замене труда рабочего. Сначала был использован рычаг (рис. 2-31), позволявший уравнивать большое усилие резания с небольшим усилием руки рабочего. Затем рычаг был заменен более эффективной механической парой — винтом и гайкой, не только увеличивающей усилие рабочего, но

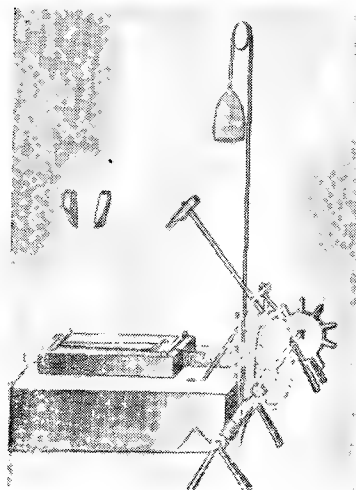


Рис. 2-30. Станок для насечки напильников, изобретенный Леонардо да Винчи.

Опускающийся груз поднимает мот-зубило через кулачковое колесо и осуществляет подачу заготовки посредством ходового винта.

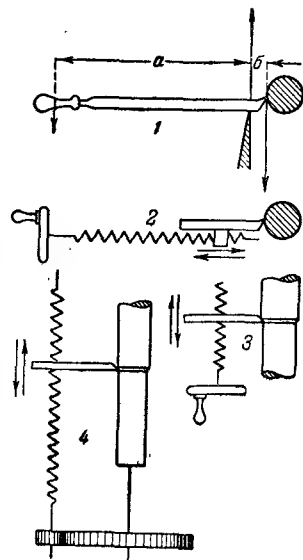


Рис. 2-31. Эволюция суппорта.

1 — резец — неравноплечий рычаг с плечами a и b ; 2 — винт и гайка для поперечного движения резца; 3 — то же для продольного движения резца; 4 — объединение через шестерни движений обрабатываемого предмета и резца в «самоходе».

и позволяющей снижать или доводить это усилие до нуля. Так как винт и гайка являются самотормозящейся парой, передающей работу только в одном направлении, они не передавали усилия резания руке рабочего. Применение двух взаимно-перпендикулярных винтов с гайками дало возможность воздействовать и на усилие резания и на усилие подачи. Наконец, присоединение винтов к шпинделю станка через ряд сменных шестерен, осуществленное

Леонардо да Винчи на сверлильном станке около 1500 г., дало возможность получить так называемый «самоход», т. е. перейти от помощи рабочему к его замене, что было сделано конструкторами самоходных суппортов А. К. Нартовым (Россия) и Г. Модсли (Англия).

Громадное значение для развития машин в феодальный период имели зерновые мельницы. Начиная с IV в. — водяное, а с X в. — ветровое колеса все шире применяются для привода мукомольных жерновов. При этом разрабатываются системы и детали привода: валы, колеса зацепления, подшипники и другие детали. Вызывая к жизни сложные механизмы, мельница вместе с тем ставила ряд задач из области механики и математики.

Развитие технологических и подъемных машин сделало совершенно необходимым обращение к неорганическим источникам энергии, поскольку живые двигатели оказались не в состоянии справляться со все возрастающей потребностью в механической энергии. Так, в свое время возникла гидроэнергетика, приведшая к постепенной замене в энергоемких производственных процессах человека-двигателя механическим двигателем. Наиболее характерными энергоемкими производственными процессами являлись: подъем воды для орошения полей и размол зерна. Рассмотрим в качестве примера зерновую мельницу. Вращение жернова требовало от работника длительной, однообразной, изнуряющей механической работы. Но, с другой стороны, именно в этой монотонной, непрерывно повторявшейся работе, не требовавшей ни мышления, ни производственного мастерства, где человек выполнял только функцию двигателя, заключалась возможность перехода к применению энергии прирученного животного или неорганической природы. Эта возможность была реализована путем использования животных и применения водяных колес.

Исключительно просто ранние водяные двигатели сочетались с водоподъемными установками. Водяное колесо, установленное на сваях, вбитых в дно потока (рис. 2-32), несло на себе ряд сосудов — элементов подъемного устройства, т. е. представляло собой конструкцию, объединявшую транспортную и энергетическую машины.

Для гидравлической установки, показанной на рис. 2-32, характерно проявление ранней формы взаимоотношения человека с окружающей его природой: присвоение

готовой энергии природы. В этом присвоении ещё не было какого бы то ни было воздействия на природу: свободно стоящие («плавающие») водяные колеса использовали только скоростную составляющую энергии воды.

Несколько более сложным было применение водяного колеса для зерновых мельниц. В этом случае между жерновом и водяным колесом необходимо было сооружать передаточный механизм, так как в силу естественных условий водяное колесо должно было вращаться вокруг горизон-

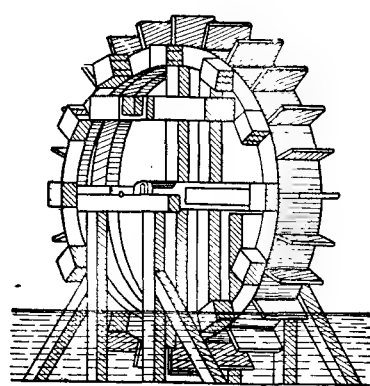


Рис. 2-32. Речное водоподъемное колесо.

Колесо приводится в движение потоком воды; на ободе колеса размещены черпаки, поднимающие воду и выливающие ее в отводной желоб.

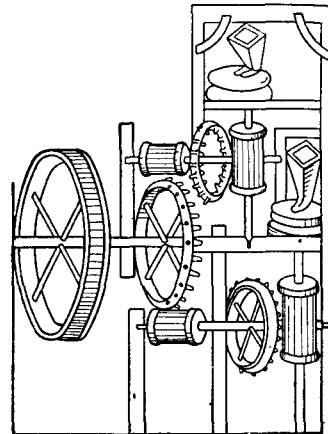


Рис. 2-33. Привод от водяного колеса к двум мельничным поставам.

От главного вала, соединенного с водяным колесом, движение передается посредством цепочных передач на вал каждого из поставов с увеличением числа оборотов.

тальной, а жернов — вокруг вертикальной оси (рис. 2-33).

Стремление обойтись без сложной механической передачи между валами, расположенными под прямым углом, привело к изысканию для привода мельничных поставов водяных колес с вертикальным валом. Для того чтобы струя воды, направляемая на лопатку такого колеса, не отклонялась силой тяжести, струе пришлось придать значительную скорость. Вход струи на плоскую лопатку с большой относительной скоростью приводил к сильному разбрызгиванию воды, и для того, чтобы избежать этого, стали делать изогнутые лопатки. Так возник прототип со-

104

временных активных гидравлических турбин (рис. 2-34).

Увеличение числа гидросиловых установок, накопленный опыт, а главное недостаток в реках с достаточно большой скоростью движения воды, необходимой для работы свободно стоящих колес, поставили задачу перехода от присвоения энергии в готовой форме к воздействию на природу с целью наиболее целесообразного использования водных энергетических ресурсов. Началось сооружение плотин или деривационных каналов, сводивших естественное падение горизонта потока, растянутого на много километров,

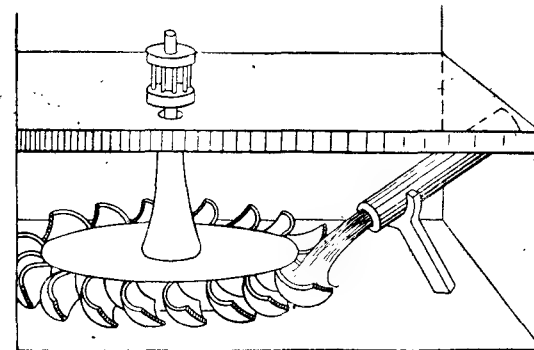


Рис. 2-34. Водяное колесо с вертикальным валом и ковшеобразными лопатками.

к одному пункту, что позволило использовать медленно текущие равнинные реки и создавать условия для эффективной утилизации гидроресурсов. При сооружении плотин можно было использовать не только скоростной элемент располагаемой энергии потока, но и энергию положения, конструируя средненаливные (рис. 2-35) и верхненаливные (рис. 2-36) водяные колеса. Верхненаливные колеса явились в то время наиболее эффективными и их к. п. д. достигал 75%. Именно в этой форме гидравлический двигатель стал элементом быстро развивавшейся энергетики феодального общества.

На территориях, не располагавших гидравлическими энергоресурсами, утилизовалась энергия воздушных потоков при помощи ветровых двигателей, преимущественно для привода мельничных жерновов. В Голландии, являвшейся классической страной ветродвигателей в силу ее

равнинного положения, эти двигатели широко применялись на водоотливных работах в многовековой борьбе голландского народа по отвоеванию суши у моря.

Ветровые установки и до настоящего времени не вышли из фазы присвоения, поскольку остается в силе невозможность воздействовать на направление и силу ветра. Крайняя неравномерность и низкая концентрация природной «готовой» ветровой энергии вместе с трудностью эффективно аккумулировать механическую энергию никогда не выводили ветровую энергию на заметное место в общем энергетическом балансе мира.

В сооружении водяных колес был достигнут значительный успех.

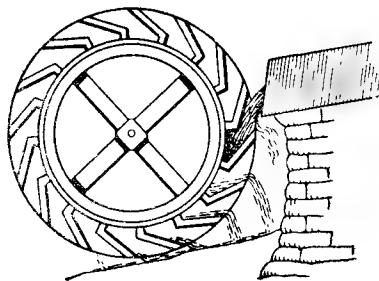


Рис. 2-35. Средненаливное водяное колесо.

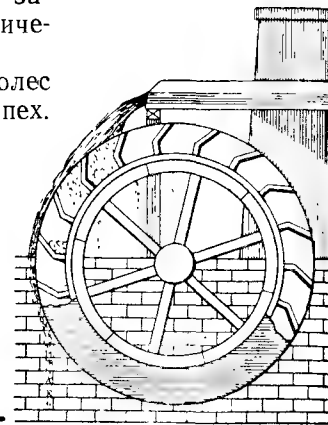


Рис. 2-36. Верхненаливное водяное колесо.

Немецкий ученый Агрикола (1490—1555 гг.) дал описание реверсивного водяного колеса (рис. 2-37), применявшегося для подъема руды из рудника. В 1582 г. была пущена в работу на р. Темзе лондонская водоподъемная установка, состоявшая из пяти подливных (нижнебойных) водяных колес диаметром 6—7 м, приводивших в движение ряд насосов и перекачивавших в сутки 18 000 м³ воды. В 1685 г. на р. Сене во Франции была сооружена водоподъемная установка для питания водой фонтанов дворцового парка Версальского дворца, состоявшая из 14 подливных колес диаметром 12 м, приводивших в действие 235 поршневых насосов, которые поднимали 3 000 м³ воды в сутки на высоту 162 м. В середине XVIII в. на Алтае К. Д. Фролов соорудил уникальную гидросиловую установку для привода подъемных и транспортных устройств двух рудников. Установка представляла собой

каскад с последовательным использованием воды на колесах, наибольшее из которых имело диаметр 17 м (рис. 2-38). Эта установка явилась высшим достижением гидроэнергетики своего времени.

Водяное колесо являлось основной энергетической базой производства в течение примерно 14 веков (с IV по XVIII в.). Во второй половине XIX в. гидроэнергетика утратила свое качественно ведущее значение, уступив его теплоэнергетике. Новый подъем гидроэнергетики, переход гидроэнергетики на новую качественную ступень наметился в самом конце XIX в. в связи с решением проблемы передачи энергии на большие расстояния электрическим током. Но и водяное колесо, потеряв в XVIII в. свое значение как основы энергетики, сравнительно медленно уступало свои позиции. Так, например, к 1917 г. в России было установлено 46 000 водяных колес; их суммарная мощность достигала 40% всей установленной в стране мощности (за исключением транспорта). В экономически отсталых странах Африки, Азии и др. и сейчас еще работает большое число водяных колес.

Кризис энергетики водяного колеса начал проявляться не в приводе зерновых мельниц натурального и мелкотоварного хозяйства, где водяные мельницы существуют и теперь, а в металлургии и рудном деле в связи с ростом потребности в орудиях труда и материалах для изготовления этих орудий, главным образом в железе. Для получения железа люди копали руду, дробили

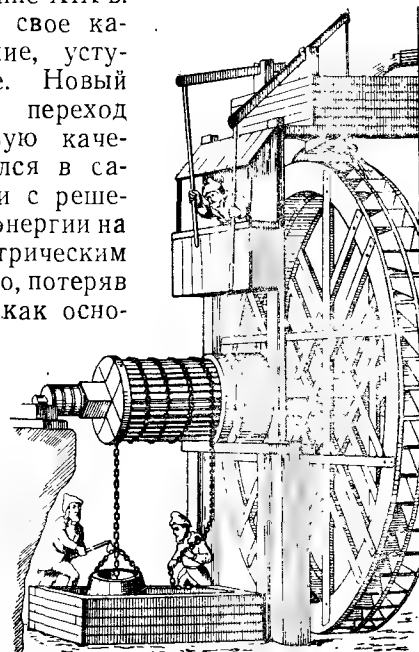


Рис. 2-37. Подъемная машина с реверсивным водяным колесом (из книги Агриколы).

Колесо имеет две системы лопастей. При направлении воды на лопасти одной системы колесо вращается в одном направлении с переключением подачи воды на другую систему лопастей колесо вращается в обратном направлении.

ее в ступах, плавил в «домницах», нагнетая в них воздух, а полученное железо проковывали под молотами. Двигателем, приводившим в движение песты дробильных ступок, мехи «домниц», молоты кузниц, был сам человек. Поскольку привод в движение перечисленных производственных агрегатов не требовал специальных знаний и навыков, че-

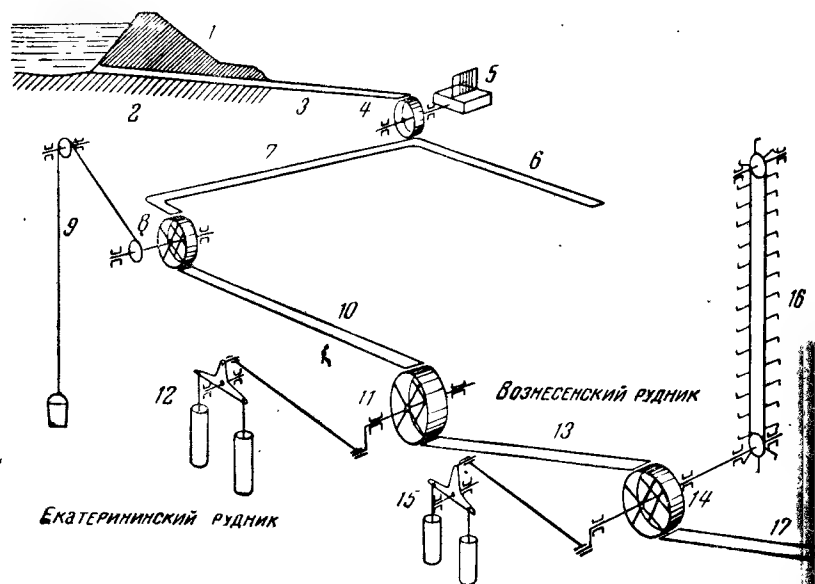


Рис. 2-38. Схема гидроэнергетической установки К. Д. Фролова.

1—плотина длиной 128 м и высотой 17,5 м; 2—шtolья длиной 443 м; 3—канал длиной 96 м; 4—водяное колесо диаметром 4,3 м; 5—лесопилка; 6—отвод воды к Преображенскому руднику; 7—подземный канал длиной 128 м; 8—водяное колесо диаметром 4,3 м; 9—рудоподъемник на высоту до 102 м; 10—подземный канал длиной 64 м; 11—водяное колесо диаметром 17 м; 12—насосы Екатерининского рудника; 13—подземный канал длиной 320 м; 14—водяное колесо диаметром 15 м; 15—насосы Вознесенского рудника; 16—рудоподъемник Вознесенского рудника; 17—отвод в р. Корбалиху; весь путь воды составляет 2 300 м.

ловек имел возможность заменить себя более мощным двигателем — водяным колесом. С заменой живого двигателя водяным колесом стало возможным увеличить размеры агрегата, которые ранее определялись мощностью человека-двигателя, а следовательно, увеличить и производство железа. Так, «домница» выросла в дому, ручной молот — в громадный молот, поднимаемый энергией водного потока, и т. п.

Теперь границы роста размеров пестов, домен, молотов определялись только мощностью водных потоков. Но в горнорудном деле и металлургии, кроме энергии, необходимы элементами производства являлись руда и горючее (дрова). Природа редко сосредоточивает в одном географическом пункте ресурсы руды, топлива и водной энергии. Поскольку водная энергия нетранспортабельна, транспорт руды и топлива к месту источника водной энергии становился элементом производства, в значительной степени определявшим себестоимость продукции. Так, энергетика водяного колеса начинала приходить в конфликт с вызванными ею же новыми производственными возможностями.

В горнорудном производстве кризис водяного колеса сказался наиболее остро. Действительно, если отсутствие в одном географическом пункте руды и леса означало лишь удорожание продукции или экономическую нецелесообразность производства металла, то отсутствие в том же географическом пункте источника энергии делало невозможным его осуществление. Истощив запасы поверхностных болотных руд, человек вынужден был все глубже проникать в недра земли. Вместе с углублением рудников росло потребление энергии на откачивание воды из них как за счет увеличения количества воды, так и за счет увеличения высоты ее подъема. Расчеты показывают, что для откачки из рудника некоторого количества воды в единицу времени требовалось для привода насосов водяными колесами иметь поток с расходом воды, в 100—150 раз большим. С увеличением глубины рудников все труднее было найти такое совпадение в одном географическом пункте рудника и достаточно мощного водного потока.

В решении задачи о рудничном водоподъеме прежде всего сказались главные ограниченности энергетики водяного колеса, о которой Маркс писал: «...употребление водяной силы, как преобладающей двигательной силы, было связано с различными затруднениями. Ее нельзя было повышать до произвольного уровня, ее недостаток нельзя было восполнить; иногда она истощалась и, главное, имела чисто локальный характер»¹.

Так возникла потребность в новой энергетике, особенно остро проявившаяся в рудничном водоподъеме.

¹ К. Маркс, Капитал, т. 1, 1955, стр. 383.

2-5. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И НАЧАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Предпосылки
и возможности
возникновения
теплоэнергетики

Новая энергетика должна была предоставить производству потребную мощность вне зависимости от тех или иных природных факторов, связанных с местными условиями.

В любом двигателе нужно различать две стороны: 1) степень его свободы или зависимости от локальных (местных) условий и 2) степень его возможной применимости для разнообразных нужд промышленности, определяемой Марксом как «универсальность по техническому применению». Двигатель, сравнительно мало зависящий от локальных условий (что определяется энергоемкостью источника энергии) и универсальный по своему техническому применению (что определяется конструктивными формами двигателя), является *универсальным двигателем*. Очевидно, что водяное колесо, связанное по своему местопребыванию с водным источником энергии, не может быть универсальным двигателем промышленности и транспорта. Но по своей конструктивной форме водяное колесо, отдающее потребителю работу в наиболее широко применяемой форме непрерывного и равномерного однонаправленного вращательного движения, является двигателем, универсальным по техническому применению.

Итак, первые требования к новой энергетике, вызванные кризисом гидроэнергетики, прежде всего в области водоподъема, направляли искания людей к новому источнику энергии, источнику, прежде всего не зависящему от местных условий. Вопрос об универсальности двигателя по техническому применению пока еще не ставился.

Очевидно, что поиски нового источника энергии требовали известных познаний закономерностей природы, без которых нельзя привлекать ее на службу обществу. В этом отношении особое значение имели открытие и изучение атмосферного давления.

Практика эксплуатации водоподъемных установок, выяснившая невозможность всасывания воды свыше некоторой определенной высоты, нанесла серьезный удар лженаучному утверждению схоластов, что «природа боится пустоты». Это утверждение было окончательно опровергнуто в 1643 г. в результате опытов итальянского ученого Э. Торричелли, установившего величину атмосферного давления. Эффектные опыты Отто фон Герике, проведен-

ные в Магдебурге в 1672 г., когда восьмерка лошадей была не в состоянии разъединить медные полушария шара, из которого был откачан воздух, обратили внимание ученых и изобретателей XVII в. на «громадную силу» атмосферного давления. Действительно, по сравнению с граммами или десятками граммов усилий, приходящихся на 1 см^2 ветровых или водяных колес, 1 кг на 1 см^2 являлся «громадной силой». «Сила» эта имеется везде и, следовательно, обещала освобождение энергетике от локальной зависимости. Величина усилия удовлетворяла любой потребности человека, который, увеличивая рабочую поверхность атмосферного двигателя, мог получать усилия, недостижимые в то время другими способами. Задача состояла только в создании вакуума или избыточного давления для образования разности энергетических потенциалов давления, дающей возможность получать работу. Для создания разности энергетических потенциалов требовалась затрата энергии. Можно получать вакуум так, как это делалось в опытах Герике, т. е. приводить в движение отсасывающий насос. Для производственных целей это неприемлемо, так как потребление энергии воздушным насосом равно энергии, получаемой от двигателя. Нужен был другой источник энергии, позволявший получить вакуум без затраты механической работы.

Тепловое расширение твердых тел было уже давно известно людям. В XVII в. было обнаружено тепловое расширение жидких тел и газов. Изменение объема жидких тел при изменении температуры было использовано для изготовления первых жидкостных термометров, хотя строители этих термометров еще не отдавали себе отчета в том, что измеряют построенные ими приборы. Тепловое расширение газов демонстрировалось при помощи бычьего пузыря с воздухом, который нагревали у камина и охлаждали на холодном полу комнаты.

Наконец, третьей предпосылкой возможности осуществления теплового двигателя, предпосылкой громадной важности являлось изучение свойств водяного пара.

Практическая деятельность людей еще до нашей эры указала на упругость водяного пара, получаемого путем кипячения воды в закрытом объеме. В начале XVI в. Леонардо да Винчи сделал набросок паровой пушки, указав на то, что она была изобретена Архимедом. В середине XVI в. в работах Кардана отмечается способность пара конденсироваться. Правда, знания о свойствах водяного

пара не отличались точностью. Многие ученые еще в XVIII в. считали пар воздухом, выделяющимся из воды при ее нагревании. Но накопленных к тому времени знаний было достаточно для изобретательской деятельности, направленной на разрешение задачи о водоподъеме. Опыты итальянца Джамбаттиста делла Порта по исследованию удельного объема водяного пара (1601 г.) показали возможность подъема воды (рис. 2-39) давлением пара на ее поверхность, причем необходимость кипятить всю поднимаемую воду исключалась применением отдельного сосуда — парогенератора — предшественника парового котла. Позднее француз Саломон де Ко описывал «страшную силу» пара, который мог, как показали опыты, разорвать толстостенный металлический сосуд и выбрасывать воду высоким фонтаном (1623 г.).

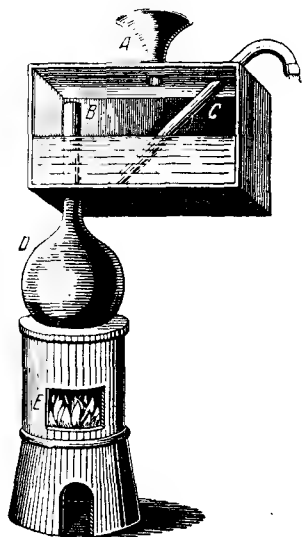


Рис. 2-39. Прибор Порты.
E — топка; D — генератор пара; B — выход пара; C — подъемная труба; A — отверстие для наливания воды.

Поиски новой энергии, способной преодолеть ограниченность гидроэнергетики водяного колеса, могли быть, следовательно, направлены по пути использования силы атмосферы, «упругой силы воздуха» или «упругой силы водяного пара». Очевидно, что все эти пути, казавшиеся различными, могли быть успешно реализованы только при обращении к использованию тепловой энергии или, как в то время стали говорить, «движущей силы огня».

Поиски новой энергии, способной преодолеть ограниченность гидроэнергетики водяного колеса, могли быть, следовательно, направлены по пути использования силы атмосферы, «упругой силы воздуха» или «упругой силы водяного пара». Очевидно, что все эти пути, казавшиеся различными, могли быть успешно реализованы только при обращении к использованию тепловой энергии или, как в то время стали говорить, «движущей силы огня».

Знания в области теории тепла в то время были весьма поверхностными. Термодинамика как наука о взаимопревращениях тепловой и механической энергий начала складываться только с середины XIX в. Становление теплоэнергетики базировалось на познании ряда закономерностей, объективно существующих в природе: атмосферное давление; расширение газов от нагревания; упругость водяного пара, получаемого путем кипячения воды; конденсация пара при его охлаждении. Эти сведения тогда еще не были уточнены, не были систематизированы и не сложились в целостную теорию. Они дали толчок практике, а практика, прокорректировав в свою оче-

редь имевшиеся познания, создала предпосылки для обобщения проверенных опытом знаний. Так, в процессе постоянного развития познания практика — этот критерий познания — способствует уточнению, углублению, систематизации знаний. Это одна из общих закономерностей развития.

С ростом производства возрастало потребление мощности, и таким образом «Увеличение размеров рабочей машины и количества ее одновременно действующих орудий требует более крупного двигательного механизма, а этот механизм нуждается в более мощной двигательной силе...»¹.

Как преодоление зависимости от местных, локальных условий, так и возможность концентрации значительных мощностей всецело зависят от свойств источника энергии, удельной энергоемкости самого энергоносителя (см. таблицу на стр. 64). Источник тепловой энергии — топливо — имеет высокую энергоемкость. Поэтому поиски нового двигателя, свободного от местной ограниченности, неизбежно приводили к тепловому двигателю и это обстоятельство во многом определяло процесс начального развития теплоэнергетики.

Рассмотрим, каким путем осуществлялся переход от гидроэнергетики к теплоэнергетике. В решении этой задачи можно выделить три этапа развития: а) двигатель выделим от исполнительного механизма (или рабочей машины); б) двигатель конструктивно обособляется от рабочей машины — потребителя энергии, но еще не становится вполне самостоятельным; в) двигатель становится самостоятельным универсальным двигателем.

Начальный период развития теплового двигателя

Ранние попытки создания теплового двигателя как двигателя, не зависящего от местных условий, были осуществлены для решения задачи о водоподъеме. Устройством такого рода, в котором двигатель конструктивно слит с потребителем энергии, явился паровой водоподъемник англичанина Севери, запатентованный им в 1698 г.

В водоподъемнике Севери (рис. 2-40) пар из котла 2 через открытый кран 4 поступал в камеру 1 и вытеснял из нее воду через нагнетательный клапан 6 при закрытом всасывающем клапане 7 в верхний резервуар 5. Затем

¹ К. Маркс, Капитал, т. 1, 1955, стр. 382.

кран 4 закрывался и камера поливалась холодной водой из специального резервуара. Пар в камере конденсировался, образовывался вакуум, и атмосферное давление заполняло камеру 1 водой через всасывающий клапан 7. Затем цикл повторялся.

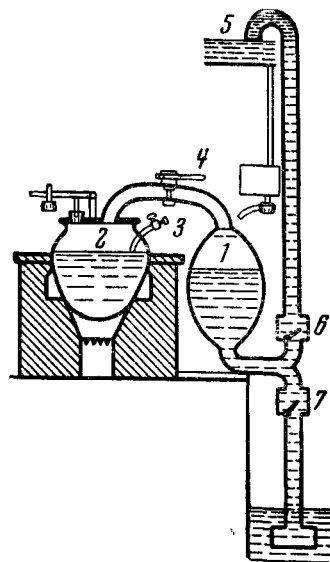


Рис. 2-40. Водоподъемник Т. Севери (1698 г.).

1—рабочая камера; 2—паровой котел; 3—трубка контроля уровня воды; 4—кран; 5—верхний резервуар; 6—нагнетательный клапан; 7—всасывающий клапан.

Соприкосновение пара с холодной водой в камере, которая являлась одновременно и двигателем и насосом, приводило к крайней неэкономичности установки, использующей на работу водоподъема только 0,5% тепла, заключенного в топливе. Тем не менее острая нужда в двигателе для откачивания воды из рудников и шахт привела к некоторому распространению установки Севери. Более того, Севери предлагал объединить его установку, способную выполнять единственную функцию — подъем воды, с водяным колесом для придания ей свойств универсальной машины. Такая комбинированная силовая установка (рис. 2-41) давала возможность водяному колесу, спо-

собному приводить в движение любую машину, работать в любой точке, где создавался искусственный напор, за счет сжигания подвезенного топлива.

Второму этапу становления теплового двигателя, когда он конструктивно отделился от машины-орудия, предшествовала работа ряда ученых и изобретателей. Энгельс писал: «Паровая машина была первым действительно интернациональным изобретением... Паровую машину изобрел француз Папин, но в Германии... Немец Лейбниц... подсказал ему при этом основную идею: применение цилиндра и поршня»¹. Можно указать также, что эта идея, вытекавшая из практики устройства поршневых насосов, лежала и в основе попыток построения теплового двигателя голландским ученым Гюйгенсом (1681 г.) и голландским аббатом Готфрейлем (1678—1682 гг.), что расширяет число участников «первого действительно интернационального изобретения».

Большая заслуга Папена состоит в том, что, исследуя работу пара в полости цилиндра, ограниченной подвижным поршнем, он впервые правильно описал последовательность процессов термодинамического цикла парового двигателя (в книге, изданной в 1698 г.). Машина Папена не была в состоянии успешно работать, поскольку все основные процессы парового двигателя (образование пара, получение работы и конденсация пара) протекали в одном агрегате — цилиндре с поршнем. Узловыми моментами последующей истории развития парового

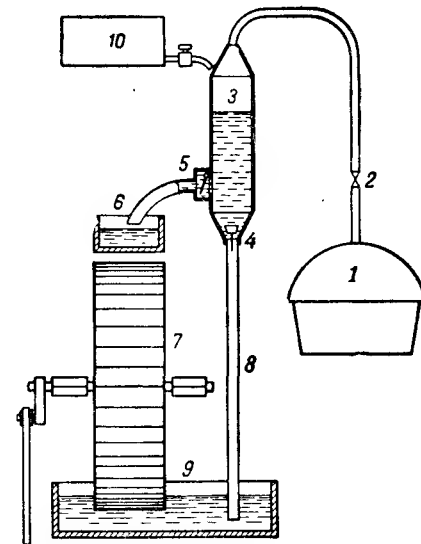


Рис. 2-41. Схема комбинированной парогидравлической установки.

1—паровой котел; 2—вентиль; 3—вытеснительная рабочая камера; 4—всасывающий клапан; 5—нагнетательный клапан; 6—водоприемный желоб; 7—водяное колесо; 8—водоподъемная труба; 9—нижний резервуар; 10—резервуар охлаждающей воды.

¹ Ф. Энгельс, Диалектика природы, 1955, стр. 81.

двигателя явились отделение от цилиндра сначала котла, а потом конденсатора.

В установке Севери цилиндр был уже отделен от двигателя, но сам двигатель был объединен с насосом, поверхность воды в котором служила как бы общим поршнем для двигателя и насоса. Применение реального поршня позволило сделать существенный шаг вперед в усовершенствовании двигателя от орудия. Этот шаг, характерный для второй фазы становления теплового двигателя, удобно проследить на водоподъемной установке Ньюкомена—Коули. Эти изобретатели также исходили из потребности откачивания воды из рудников, причем она воспринималась ими в конкретной форме замены лошадей или водяного колеса, применявшихся для приведения в действие рудничных насосов. Работа сводилась к необходимости периодически поднимать длинную насосную штангу, выходящую на поверхность земли; опускалась штанга под действием собственного веса. Таким образом, периодичность работы насоса простого действия, установленного на дне шахты, хорошо согласовывалась с периодичностью работы пара в полости двигателя.

При опускании насосной штанги n и груза m под действием тяжести поршень h (рис. 2-42) поднимался и в освобождающееся под ним пространство через открытый кран k поступал пар из котла a , где давление лишь слегка превышало наружное (атмосферное) давление. При этом работа пара аккумулировалась в атмосферном давлении. При достижении поршнем верхнего положения кран k закрывался и кран o открывал доступ в полость цилиндра холодной воде из резервуара g по трубке p . Холодная вода конденсировала пар, в цилиндре образовывался вакуум, и атмосферное давление возвращало аккумулированную в нем работу, двигая поршень вниз и производя подъем насосной штанги.

Отделение двигателя от насоса давало возможность изменять соотношение диаметров их поршней и получать высокое давление в насосе при низком давлении в двигателе, а следовательно, поднимать воду с больших глубин при низком давлении пара в котле. Так, одна из реальных установок, построенных в Англии, поднимала воду на высоту 80 м, и, следовательно, давление на поршень насоса должно было быть 8 кг/см^2 . Поршень насоса имел диаметр 9 дюймов, а поршень двигателя — 36 дюймов. Очевидно, отношение площадей поршней насоса и двига-

теля было $36^2 : 9^2 = 16$, а поэтому и давление на поверхность поршня двигателя должно было составлять всего $8 : 16 = 0,5 \text{ кг/см}^2$. Это давление на поршень двигателя легко достигалось путем получения под поршнем вакуума при вбрызгивании воды; рабочее давление было равно 1 кг/см^2 (давление атмосферы) минус $0,5 \text{ кг/см}^2$ (давление

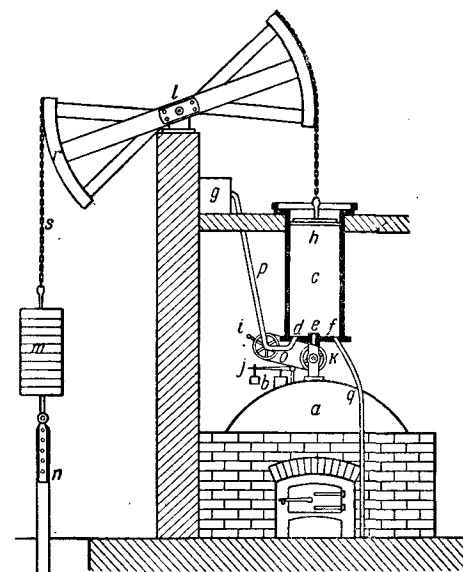


Рис. 2-42. Паровая водоподъемная установка Ньюкомена—Коули.

a — паровой котел; c — цилиндр; h — поршень; k — паропускной кран; o — маховичок водопускного крана; i — рукоятка управления впускном паром и воды; g — резервуар охлаждающей воды; p — водоподводящая трубка; q — трубка для спуска конденсата; l — балансир; j — рычажный предохранительный клапан с грузом b ; m — груз аккумуляирования; n — верхний конец насосной штанги.

ние под поршнем, вакуум), т. е. потребные для подъема воды $0,5 \text{ кг/см}^2$.

Насосы описанной конструкции применялись почти в течение столетия, хотя, отдавая работу прерывно, они являлись весьма ограниченными по возможностям их использования. Однако они подготовили условия для следующего шага в развитии теплоэнергетики — становления универсального двигателя.

**Возникновение
потребности
в универсальном
двигателе**

Потребность в новой технике в любой ее форме и, в частности, в универсальном двигателе возникает как задача, решение которой оказывается возможным благодаря предварительному возникновению потребных для этого решения материальных условий.

Потребность в универсальном двигателе в значительной степени явилась следствием развития мануфактурного производства. На мануфактурах вначале стала требоваться замена человека-двигателя двигателем, использующим энергию неорганической природы. Такая замена вытекала из значительного роста на мануфактурах числа устройств, для которых двигателем служил человек, и увеличения мощности, потребной для приведения в действие многих отдельных механизмов или групп механизмов. В таких случаях функция двигателя передавалась водяному колесу.

Вторая, более поздняя фаза развития мануфактур потребовала замены двигателя частного назначения универсальным двигателем. В этом случае гидравлический двигатель уже не удовлетворял нуждам производства в силу своей зависимости от локальных условий. Тепловой двигатель частного назначения, отдававший работу прерывно, был непригоден для привода разнообразных новых рабочих машин. Эта непригодность хорошо выражена в пояснительной записке И. И. Ползунова к его проекту универсального двигателя 1763 г., где он ставил задачу «... сложением огненной машины водяное руководство пресечь, и его, для сих случаев, вовсе уничтожить, а вместо плотин за движимое основание завода ее (т. е. огненную машину — *Авт.*) учредить так, чтобы она была в состоянии... по воле нашей, что будет потребно, исправлять». Таким образом, вторая фаза потребности мануфактурного производства в универсальном двигателе сводилась к отрицанию водяного колеса как двигателя локального, но передаче его свойства двигателя, универсального по техническому применению, тепловому двигателю, чтобы он стал в состоянии «что будет потребно, исправлять».

Одно из требований универсальности по техническому применению — необходимость непрерывной отдачи работы — было предъявлено к двигателю транспортными установками, которые пробовали осуществить до промышленного переворота, когда потребность в механическом транспорте становилась крайне острой. Возможность удовле-

творения этой потребности уже сложилась в виде стационарного универсального двигателя. Поэтому в результате промышленного переворота механический паровой транспорт возник совершенно закономерно, придав универсальному двигателю специфические особенности: минимум веса на единицу мощности, отсутствие фундамента, возможность реверсирования.

История показывает нам примеры интересных попыток осуществления отдельных транспортных установок еще

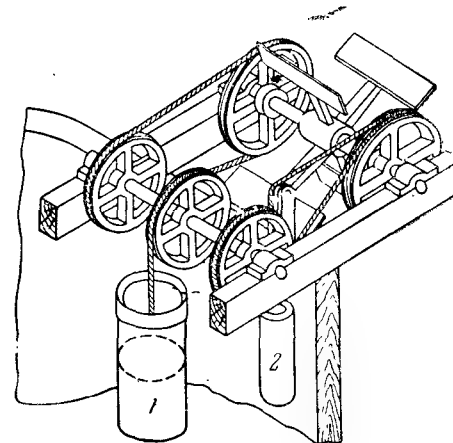


Рис. 2-43. Схема судовой установки Хелла.
1 — паровой цилиндр; 2 — груз механического аккумулятора.

до промышленного переворота, имевших военное назначение. К таким попыткам относится предложение Джона Хелла, запатентованное им в 1736 г. в Англии. Хелл использовал пароатмосферный двигатель Ньюкомена — Коули для приведения в движение гребного колеса небольшого судна — портового буксира — в системе военно-морского парусного флота (рис. 2-43). В 1769 г. Французский офицер Жозеф Кюньо построил паровую повозку для перевозки крупных артиллерийских орудий (рис. 2-44).

Оба изобретения не имели успеха, но показывают, что в XVIII в. уже возникали потребности в паровых транспортных установках и имелись принципиальные возможности для их удовлетворения.

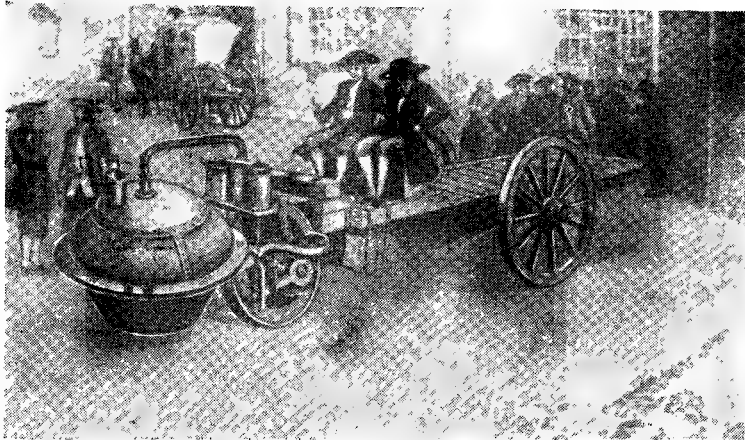


Рис. 2-44. Паровая повозка Кюньо.

Итак, XVIII в. — век нарастания потребности в универсальном двигателе. Частные потребности в универсальном двигателе, возникшие еще до начала промышленного переворота в мануфактурном производстве и военном деле, определили начальный период становления универсального двигателя. Они обусловили нахождение ряда технических решений и создали все условия для решения задачи об универсальном двигателе после того, как первый этап промышленного переворота сделал решение этой задачи совершенно необходимым и неизбежным.

2-6. ПОСТРОЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Какую же конкретную форму технической задачи принимали требования производства к новому, универсальному двигателю?

Технические
требования
к универсальному
двигателю

Непрерывность отдачи работы была первым и основным требованием, которое предъявлялось к универсальному двигателю со стороны новых рабочих машин. Обладавший непрерывной отдачей работы гидравлический двигатель — водяное колесо не могло быть универсальным двигателем из-за его зависимости от локальных условий. С этих позиций универсальным двигателем мог стать только тепловой двигатель благодаря высокой удельной энергоемкости источника дви-

жущей его энергии — топлива. Но процесс преобразования теплоты в механическую работу — процесс циклический, принципиально периодический; рабочее тело теплового двигателя отдает работу периодически, прерывно. Периодичность действия разных тепловых двигателей не мешала приводу в движение периодически действующих паровых насосов, но была неприемлема для привода разнообразных станков машинного производства. В 1829 г. французский ученый Араго писал: «... атмосферная машина для выкачивания воды представляет собой снаряд безукоризненный, и прерывность ее действия не представляет никаких неудобств. Совсем другое в том случае, когда упомянутая машина употребляется в виде двигателя. Орудия и инструменты, приводимые ею в действие, движутся весьма быстро все время нисхождения поршня, но во время его восхождения они останавливаются или продолжают действовать только силой приобретенной скорости»¹. В приведенном отрывке выражена мысль, которую можно сформулировать следующим образом: двигатель прерывного действия не может быть двигателем, универсальным по его техническому применению. Конкретный, осуществленный двигатель всегда предназначен выполнять возлагаемые на него частные функции: вращать ротор электрогенератора, двигать поршень насоса или приводить в движение гусеничные ленты трактора. Универсальный двигатель должен обладать способностью принимать разнообразные частные конкретные формы в зависимости от потребностей производства. Но как бы ни отличались эти частные потребности производства, они прежде всего могут выполняться такими отдельными двигателями, которым присуще общее свойство: отдавать работу непрерывно. Двигатель, не имеющий свойства отдавать работу непрерывно, не может быть двигателем универсальным.

Перечисленные выше требования к универсальному двигателю дают возможность сформулировать техническое содержание возникшей в свое время задачи об универсальном двигателе: сконструировать в системе двигателя передаточный механизм, прерывно воспринимающий механическую работу от рабочего тела двигателя и непрерывно отдающий ее потребителю.

¹ Ф. Араго, Историческая заметка о паровых машинах, СПб, 1861, стр. 17.

Направление решения задачи о непрерывной работе двигателя

Было несколько возможностей решения общей задачи — получения непрерывной отдачи работы потребителю. Перейдем к рассмотрению этих форм.

а) *Роторный двигатель*. В роторном (турбинном) двигателе принципиальная периодичность отдачи работы от рабочего тела не вызывает периодичности в работе двигателя. Это достигается тем, что рабочее тело, отдавая механическую работу деталям двигателя, само движется так, что его состояние в каждой точке двигателя остается

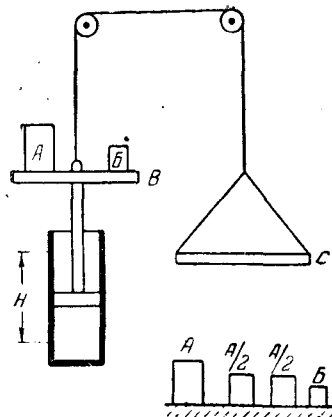


Рис. 2-45. Схема применения механического (грузового, потенциального) аккумулярования.

неизменным. В поршневом двигателе цикл рабочего тела совпадает с циклом движения рабочих частей двигателя. В турбинном двигателе каждый килограмм рабочего тела меняет свое состояние, проходя через турбину, но в каждой точке турбины проходящий через нее пар имеет одно и то же состояние; поэтому термодинамический цикл рабочего тела не вызывает цикличности работы двигателя.

Однако турбинный двигатель был совершенно неприемлем в XVIII в.: паровая турбина — по своей природе двигатель весьма быстрый.

Освоение этой быстроты было не под силу технике того времени, и, кроме того, не было создано материальных условий для решения задачи о паровой или газовой турбине.

Одним из методов получения непрерывной работы от поршневого теплового двигателя может служить *механическое аккумулярование*, осуществляемое в двух различных формах: потенциальной и кинетической.

б) *Потенциальное механическое аккумулярование*. Расширение рабочего тела в полости цилиндра (рис. 2-45) при подводе к нему тепла позволяет получить механическую работу в виде подъема грузов *A* и *B* на платформе *B* на некоторую высоту *H*. По достижении высшей точки подъема груз *A* снимается, а груз *B*, опускаясь, соверша-

ет работу, необходимую для того, чтобы термодинамический цикл замкнулся (предполагается, что платформы *B* и *C* взаимно уравновешены). Движение поршня двигателя будет непрерывным (вверх и вниз), но внешнему потребителю работа будет отдаваться прерывно (только за период подъема поршня). Часть работы, совершаемой рабочим телом в процессе расширения, и в количестве, равном произведению веса груза *B* на высоту подъема *H*, аккумулируется для выполнения работы сжатия, обеспечивающей возврат поршня в исходное положение. Описанный метод получения непрерывного циклического движения механизма двигателя с прерывной отдачей работы внешнему потребителю был применен в насосном двигателе Ньюкомена — Коули, где груз, подвешенный на конце балансира, выполнял ту же функцию, что и груз *B* рассмотренной схемы.

Заменим груз *A* двумя грузами *A/2*. При подходе поршня к верхнему положению снимем один из грузов *A/2* с платформы *B* и перенесем его на платформу *C*, находящуюся в этот момент в крайнем нижнем положении. Так как грузы *A/2* равны и, следовательно, обе платформы уравновешены, груз *B*, опускаясь, как и в первом случае, вернет поршень двигателя в исходное положение. За один цикл (подъем и опускание поршня) во втором случае, как и в первом, внешний потребитель получает одну и ту же работу:

$$AH = \left(\frac{A}{2} + \frac{A}{2} \right) H,$$

которая отдана ему непрерывно: половина за период подъема поршня (на платформе *B*) и половина за период опускания его (на платформе *C*). Задача решена исключительно просто путем увеличения количества аккумулярованной энергии за период рабочего хода. В первом случае была аккумулярована энергия *BH*, достаточная только для возврата поршня в исходное положение, во втором случае — энергия $\left(B + \frac{A}{2} \right) H$, достаточная не только

для возврата поршня в исходное положение, но и для отдачи работы внешнему потребителю во время «холостого» хода в таком же количестве, в каком она отдается ему во время «рабочего» хода. В период 30—70-х годов XVIII в. предложения о двигателе с непрерывной отдачей работы за счет механического потенциального аккумуля-

рования выдвигались неоднократно. На рис. 2-46 показан схематический чертеж одного из таких двигателей, заимствованный из технической литературы XVIII в.

в) *Кинетическое механическое аккумулятивное.* Этот вид механического аккумулятивного части работы одного

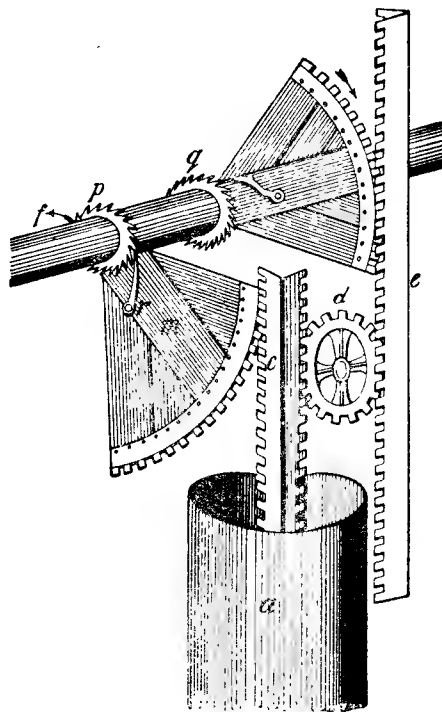


Рис. 2-46. Двигатель с грузовым механическим аккумулятивным.

a — цилиндр простого действия; *e* и *e* — рейки с зубцами, расположенными под углом 90° (рейка *e* несет аккумулятивный груз, не показанный на чертеже); *d* — зубчатая шестерня; *m* — один из зубчатых секторов, свободно сидящих на валу *f*; *p* и *q* — храповые колеса; *r* — одна из храповых "собачек".

хода двигателя (для того, чтобы отдать ее потребителю во время второго хода) достигается в случае работы поршневого двигателя на вращающийся вал путем посадки на вал маховика с достаточно большой массой. Распределение усилий в звеньях кривошипно-шатунного механизма таково, что даже при постоянном усилии на поршень вал

получает вращающий момент, изменяющийся от нуля до некоторого максимума. Поэтому маховик как метод получения равномерного вращательного движения вала при неравномерности вращающего момента применяется и у двигателей с непрерывной отдачей работы от рабочего тела. Но у двигателя с прерывной отдачей маховик должен выравнивать не только *неравномерность* движения, но и *прерывность* движения, а поэтому при прочих равных условиях маховик для двигателя прерывного действия должен иметь более чем вдвое большую массу (отнесенную к тому же радиусу), чем для двигателя непрерывного действия.

Суммирование работы нескольких полостей поршневого двигателя для получения непрерывной работы может осуществляться в двух различных конструктивных формах: суммирование работы *двух полостей одного цилиндра* и суммирование работы *двух (и более) полостей двух (и более) однополостных цилиндров*. В исторически сложившейся технической терминологии в первом случае имеет место *двигатель двойного действия*, а во втором — *многоцилиндровый двигатель*.

г) В цилиндре двигателя двойного действия имеются две рабочие полости, разделенные движущимся поршнем. Когда в одной из полостей происходит процесс расширения рабочего тела, то образующаяся при этом механическая работа через шток двигателя отдается внешнему потребителю, а частично (непосредственно через поршень двигателя) — рабочему телу второй полости, производя работу сжатия. При обратном движении поршня распределение работы соответственно изменяется. Таким образом, поршень двигателя передает работу внешнему потребителю во время движения как в одном, так и в обратном направлении, т. е. непрерывно. У такого двигателя, отдающего работу валу как за первые, так и за вторые его полуоборота, маховик будет вдвое меньше, чем у двигателя, в цилиндре которого имелась бы одна только рабочая полость и работа отдавалась бы валу прерывно. Но маховик и у двигателя двойного действия остается существенно необходимым как для выравнивания неравномерного вращающего момента, получающегося в результате применения кривошипно-шатунного механизма, так и для перехода двигателя через мертвые положения. Таким образом, в случае необходимости вращательного движения вала двигателя метод суммирования путем применения двух рабо-

чих полостей в одном цилиндре применим только в комбинации с методом кинетического аккумулирования.

д) *Многоцилиндровый двигатель* с числом цилиндров не менее 2 дает возможность суммировать развиваемую в отдельных цилиндрах работу на общем валу таким образом, чтобы период отдачи работы одним из цилиндров совпадал по времени с периодом потребления ее другим. При таком суммировании вал двигателя получает работу (за вычетом работы сжатия) так же непрерывно, как и вал двигателя двойного действия, и может обеспечивать вращательное движение при маховике вдвое меньшей массы, чем у двигателя прерывного действия.

Вместе с тем многоцилиндровый двигатель обладает качеством, которым не может обладать двигатель двойного действия. Увеличивая число цилиндров и назначая соответственный сдвиг по времени рабочих ходов этих цилиндров, мы имеем возможность обеспечивать не только непрерывную, но и равномерную отдачу вращающего момента двигателя без применения маховика. Возможность отказа от тяжелого маховика, неприемлемого для транспортных двигателей с их низкими весовыми показателями на единицу мощности и с их нуждой в реверсировании, сделала многоцилиндровый двигатель самым распространенным двигателем современной транспортной техники.

Разработка методов получения непрерывной работы двигателя

Упомянувшиеся выше попытки построения универсального двигателя для транспорта с применением потенциального механического аккумулирования оказались безуспешными.

В дальнейшем потенциальное механическое аккумулирование для двигателей с вращательным движением вала комбинировалось с кинетическим. Кинетическое механическое аккумулирование в его чистом виде получило свое начальное применение, начиная с середины XIX в., в одноцилиндровых двигателях внутреннего сгорания. В период становления универсального двигателя в процессе развития четвертого этапа промышленного переворота (последняя четверть XVIII в.) кинетическое аккумулирование имело достаточно широкое распространение в комбинации с другими методами.

Метод суммирования работы двух цилиндров был впервые предложен и детально разработан И. И. Ползуновым (1728—1766 гг.). В стремлении сконструировать

универсальный двигатель, «...способный по воле нашей что потребно исправлять», он исходил из кризиса гидроэнергетики, остро проявившегося в горнорудной промышленности России. Ползунов поставил задачу радикального переворота в энергетике путем замены гидравличе-

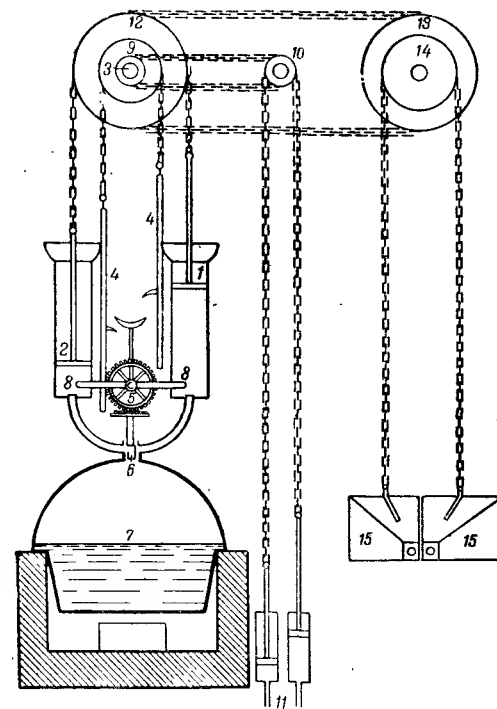


Рис. 2-47. Схема проекта универсального двигателя И. И. Ползунова, 1763 г.

1 и 2—поршни; 3—главный вал двигателя; 4—штанги пароводораспределительного механизма; 5—водораспределительный кран; 6—парораспределительный кран; 7—паровой котел; 8—трубы для впрыскивания охлаждающей воды в полости цилиндров; 9 и 10—привод к насосам; 11; 12—14—привод к воздушным мехам 15.

ских установок паровыми машинами универсального характера.

В проекте своего универсального двигателя (1763 г.) Ползунов ввел суммирование работы двух цилиндров на общий вал. По этому проекту (рис. 2-47) поршень 1, опускаясь под давлением атмосферного воздуха, отдавал механическую работу валу 3 и одновременно поднимал пор-

шень 2 другого цилиндра. При опускании поршня 2 происходило обратное распределение работы. Вал 3 получал работу непрерывно, то от одного, то от другого цилиндра. От вала движение передавалось штангам 4, двигавшим зубчатые шестерни механизма, управляющего кранами 5 и 6, которые поочередно подавали в цилиндры двигателя то пар из котла 7, то охлаждающую воду по трубам 8. От того же главного вала двигателя движение передавалось через шкивы 9 и 10 насосам 11, нагнетавшим воду в верхний резервуар, откуда она расходовалась самотеком на питание парового котла и охлаждение пара в цилиндрах. Работа внешнему потребителю — воздушным мехам 15 — передавалась через шестерни 12, 13 и 14.

Из описания двигателя видно, что он был в состоянии выполнять широкий ряд функций, недоступных для насосных двигателей. Он прежде всего представлял собой самостоятельный двигатель, не связанный с рабочей машиной. Этот двигатель мог приводить в действие орудия, непрерывно потребляющие энергию, так как в нем имелись две цепи, передающие работу непрерывно в двух направлениях. Он не ограничивал свободу выбора направления движения орудия, так как не использовал сил тяжести, а также позволял изменять размах и усилие путем соответствующего подбора диаметров передающих шкивов. Кроме того, впервые в конструкции Ползунова тепловой двигатель был в состоянии осуществить групповой привод, отмеченный Марксом как этап в развитии машин.

Рецензент проекта Ползунова президент Берг-коллегии А. И. Шлаттер дал высокую оценку работе Ползунова, но не сумел понять основного замысла Ползунова — замены водяных колес, сковывавших развитие производства, паровыми машинами. Поэтому Шлаттер предложил Ползунову осуществить комбинированную установку: паровым насосом поднимать воду и направлять ее на водяные колеса. Ползунов не принял рекомендации Шлаттера и в 1765 г. осуществил постройку нового двигателя большой мощности для целей воздухопоснабжения металлургических печей. Этот двигатель (рис. 2-48) имел также два рабочих цилиндра 1, двигавших балансиры 2—2 и 3—3, от которых движение передавалось двум промадным воздушным мехам 10. С малого балансира 4 через штангу 6 и колесо 7 движение передавалось паро-водораспределительному механизму, а с балансира 5 через полубалансир 8 — к насосам 9. Через общую камеру 11 сжатый

128

воздух подавался в аккумулятор дутья — «воздушный ларь» 12, из которого он по трубам распределялся между группой медеплавильных печей.

Сопоставление установки Ползунова с предложением Шлаттера показывает прогрессивность идей Ползунова и его большой вклад в развитие техники. По проекту Шлаттера (рис. 2-49, I) паровые насосы 1—2 подают воду в резервуар 3, откуда она по желобу 4 поступает на водя-

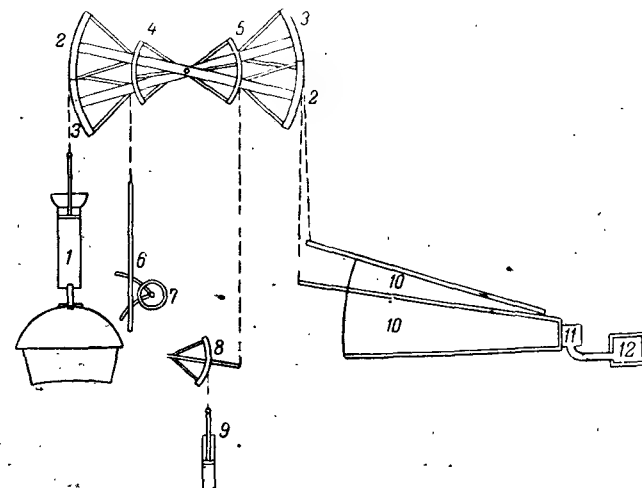


Рис. 2-48. Схема воздуходувной установки Ползунова, 1765 г.

1 — паровой цилиндр (второй такой же цилиндр скрыт за цилиндром 1); 2 — 2 и 3 — балансиры, передающие движение воздушным мехам 10 — 10; 4 — полубалансир для привода паро-водораспределительного механизма 6 — 7; 5 — полубалансир для привода насосов 9 через рычаг 8; 11 — выход сжатого воздуха; 12 — «воздушный ларь» — аккумулятор дутья.

ные колеса 5, которые через механизм 6—7 передают движение воздушным мехам 8; канал 9 служит для отвода отработавшей на колесах воды. В установке Ползунова (рис. 2-49, II) двигатель с двумя цилиндрами 1 приводит в движение воздушные мехи 2; воздух из аккумулятора 3 по трубам 4 раздается по группе печей.

Помимо громадного упрощения установки, видного из приведенных схем, Ползунов, отказавшись от промежуточного носителя энергии в виде поднятой воды, более чем вдвое увеличил экономичность установки.

Однако в феодальной крепостнической России не было экономической базы для внедрения паровых двигате-

лей. Поэтому после героического труда Ползунова строительство паровых машин в России не велось более чем столетия.

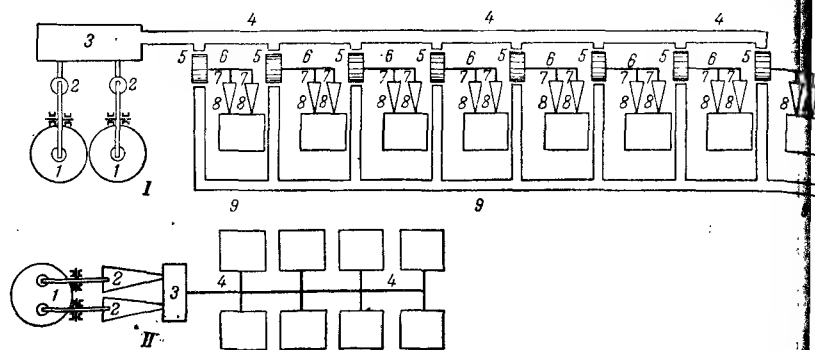


Рис. 2-49. Сравнительная схема проектов Шлаттера и Ползунова.

Дальнейшие попытки конструирования универсального двигателя были вызваны промышленным переворотом в последней трети XVIII в. и описываются в следующей главе.

Историческая обусловленность конкретных форм ранней теплоэнергетики

Изучая конкретные тепловые двигатели, строившиеся в XVIII в., можно задать себе ряд вопросов: почему первые тепловые двигатели были паровыми, а не газовыми; насосными, а не универсальными; поршневыми, а не роторными; пароатмосферными, а не двигателями избыточного давления? Проявлялась ли здесь воля изобретателей или же были какие-то объективные условия, определявшие конкретные пути становления теплоэнергетики?

Рассмотрим, какие объективные условия определяли пути становления теплоэнергетики и как они влияли на конструктивные формы теплосиловых установок.

1. Паротехника как первичная форма теплоэнергетики. Изучение исторических фактов показывает, что в процессе становления теплоэнергетики имели место попытки осуществления как газовых двигателей (Гюйгенс, Папен) так и паровых двигателей (Вустер, Севери, Ньюкомен, Папен, Ползунов). В результате этих попыток от газовых двигателей отказались, а паровые стали развиваться

Причины этого таковы. Во-первых, для успешной работы газовых двигателей необходима более высокая начальная температура рабочего тела, чем для паровых двигателей. Во-вторых, что было весьма существенно для начального периода теплоэнергетики, водяной пар легко конденсируется при охлаждении его водой. Это свойство водяного пара имело громадное значение, поскольку оно легко позволяло получить вакуум в пароатмосферных двигателях. Еще опыты Папена показали, что конденсировать газ путем охлаждения водой невозможно. Таким образом, пар как рабочее тело тепловых двигателей имел преимущества перед газами как для двигателей избыточного давления, получаемого в паровых котлах без затраты механической энергии на сжатие, так и для двигателей пароатмосферных (с вакуумом), где пар предоставлял возможность легко получать вакуум посредством охлаждения водой без затраты механической энергии на разрежение.

Следовательно, предпочтение пара, как рабочего тела явилось следствием не личных вкусов, устремлений и идей изобретателей, а было продиктовано конкретными условиями, среди которых главными являлись свойства водяного пара.

2. Пароатмосферные двигатели — закономерный этап в развитии теплоэнергетики. В течение целого столетия, совпадающего почти точно с XVIII в., преобладающим тепловым двигателем являлся пароатмосферный двигатель. Построение пароатмосферных двигателей в XVIII в. не следует рассматривать как следствие недомыслия изобретателей той эпохи. Наоборот, пароатмосферный двигатель возник и держался в энергетике целое столетие только потому, что для своего времени он был наилучшим конкретным решением задачи о тепловом двигателе. Еще в 1689 г. Д. Папен совершенно правильно описал цикл пароатмосферного двигателя. Оставалось только изыскать и совершенствовать конструктивные формы этого двигателя, что и было сделано рядом изобретателей.

Почему же пароатмосферный двигатель был лучшим решением задачи о тепловом двигателе в XVIII в.?

Во-первых, потому, что пароатмосферный двигатель обеспечивал потребную мощность. Практически получаемые рабочие усилия на поршне пароатмосферного двигателя составляли примерно $0,5 \text{ кг/см}^2$. Это значит, что в двигателе с диаметром поршня 0,5 м можно было полу-

9*

чить рабочее усилие около 1 т, а с диаметром 1 м — около 4 т. Это была поистине «мощная двигательная сила» по сравнению с той, которую давали водяные и ветровые колеса. Действительно, при 4 000 кг, действующих на поршень двигателя с ходом поршня 2 м и частотой ходов 15 в минуту, мы имеем индикаторную мощность

$$\frac{4'000 \cdot 2 \cdot 15}{60 \cdot 75} = 53,3 \text{ и. л. с.},$$

которую можно было получить в любой точке земной поверхности, тогда как мощность зависимых от локальных условий водяных колес редко превосходила 5 л. с.

Во-вторых, пареоатмосферный двигатель не требовал пара избыточного давления, получение которого было весьма сложным в условиях всего XVIII в. Основные детали конструкции котла — стальная прокатный лист или цельнотянутая стальная труба — были освоены производством только в XIX в. В XVIII в. котлы строили из медных листов, откованных вручную, имевших площадь не более 0,5 м²; только к концу XVIII в. эти листы стали отковывать из мягкого железа. В этих условиях пареоатмосферный двигатель, работавший без избыточного давления, был исключительно целесообразным.

3. *Поршневой двигатель* как ранний тепловой двигатель. Исследование исторического материала показывает, что теплоэнергетика в течение целых двух веков имела своей основой только поршневые двигатели. Этот факт является следствием ряда конкретных условий, сопровождавших становление и ранний период существования теплового двигателя.

В развитии теплоэнергетики, как и в развитии всех областей техники и познания, в развитии от простого к сложному, от низшего к высшему, статика предшествовала динамике. Представление о «силе атмосферы» или «силе пара» связывалось прежде всего с представлением о давлении, использование которого как составляющей работы при любом его знаке (выше или ниже атмосферного) возможно было только при наличии замкнутого объема. Таким замкнутым объемом являлись либо камера вытеснительного насоса, где пар давил на воду, либо цилиндр двигателя, где создавалось результирующее давление как алгебраическая сумма атмосферного давления и разрежения под поршнем. При этом следует заметить, что конструктивная форма цилиндра с поршнем возникла

в поршневых насосах значительно раньше, чем в теплоэнергетике.

Были попытки построения роторного двигателя: паровую турбину сооружали Дж. Бранка, П. М. Залесов; газовые турбины имели своих предшественников в виде лопастных колес, вращаемых потоком дымовых газов очага («механический вертел»). Но эти устройства не могли получить развития до конца XIX в. по следующим причинам.

Прежде всего следует иметь в виду, что двигатель — не самоцель, а средство для приведения в движение исполнительного механизма. Поэтому исполнительный механизм предъявлял к двигателю свои требования, определявшие конструктивные формы последнего. До 70-х годов XVIII в. подавляющее большинство исполнительных механизмов (песты, молоты, мехи) имело поступательно-возвратное движение; поэтому двигатель с вращательным движением был не нужен.

Вторая причина состоит в том, что скорость движения струи пара в сотни раз больше скорости струи воды. Отсюда ненужная в практике того времени быстроходность турбины как двигателя. Быстроходный двигатель стал необходим значительно позже, когда понадобилось приводить во вращательное движение с большой скоростью такие устройства, как, например, молочный сепаратор или электрогенератор.

4. *Насосные установки* как ранние теплосиловые установки. Сложный комплекс условий predetermined и назначение ранней теплоэнергетики. Теплоэнергетика возникла прежде всего на том участке, где несостоятельность гидроэнергетики проявилась наиболее резко, т. е. в деле рудничного водоподъема. Именно здесь имелись наиболее созрелые материальные условия.

Действительно, для решения задачи об универсальном двигателе нужно было пройти долгий и сложный путь изыскания и освоения нового передаточного механизма. Задача водоподъема могла быть решена путем непосредственного воздействия рабочего тела (пара) на поверхность перемещаемой им воды. В такой именно форме, дополняемой второстепенными признаками, она и решалась рядом изобретателей (Вустер, Севери, Папен). При этом одновременно была решена и важнейшая общая задача теплоэнергетики: был осуществлен впервые термодинамический замкнутый цикл теплового двигателя. Кроме того, была изыскана конструктивная форма простейшего передаточного

механизма (балансир), которая в свою очередь оказалась в числе условий, необходимых для возникновения универсального двигателя.

Таким образом, становление теплоэнергетики в ее ранней конкретной форме насосных установок было обусловлено комплексом условий, диктовавших изобретателям не только направление решения задачи, но и конструктивные формы этого решения.

Все эти условия определялись практикой. Что касается вопросов теории, то они сильно отставали от практики. Наука феодального периода обобщала в теорию опыт механических устройств, но еще не обратила орудия своего исследования на теплоту как основу энергетики последующего периода.

2-7. НАУКА ФЕОДАЛЬНОГО ОБЩЕСТВА И ПЕРИОДА МАНУФАКТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Зарождение
экспериментальной
науки и ее успехи
в XVI—XVIII вв.

Развитие науки феодального общества имело преемственную связь с наукой рабовладельческого периода. Достижения античной науки получили свое дальнейшее развитие главным образом благодаря арабам, которые не только сохранили античное наследство, но и обогатили его на основе знакомства с культурой Индии и Китая. Что же касается европейской науки, то она в период раннего средневековья находилась в состоянии застоя и упадка. Господство церкви не только задерживало прогресс научной мысли, но и приводило на костер инквизиции передовых мыслителей средневековья.

Однако в XI—XII вв. под влиянием развития производительных сил и роста торговли наука, преодолевая преграды церковной реакции, все более откликается на требования производства.

Если в античном мире научные исследования были чисто умозрительными, то в феодальный период ученые все чаще начинают прибегать к опыту. Внедрение опыта — этого нового метода исследования — способствовало более интенсивному развитию естествознания, не только дополнявшему достижения античной науки, но и решившему ряд новых задач, возникавших в процессе производственной деятельности общества.

Значительным толчком для развития экспериментальной науки явились великие географические открытия XV—XVI вв., доставившие богатейший естественнонауч-

ный материал. Кроме того, они ускорили развитие торговли, мореплавания, военного дела и тем самым поставили перед наукой ряд практических задач, решение которых было невозможно с позиций средневекового схолистического мировоззрения.

Общему подъему культуры способствовали такие изобретения, как порох, компас и книгопечатание, а также освоение таких механизмов, как мельница и часы, служивших, по словам Маркса, отправным пунктом исследований многих ученых и подготовивших почву для последующего развития машинной индустрии. Родиной выдающихся изобретений — пороха и компаса — является страна древнейшей культуры — Китай.

В рассматриваемый период отдельные ученые приходили к широким научным обобщениям, достаточно точно отображающим закономерности реального мира. Наиболее существенные достижения были сделаны в механике. Статика дополнилась динамикой, начальные основы которой для движения твердых тел разработал Г. Галилей. Свое дальнейшее развитие динамика твердых тел получила в работах французских ученых Декарта, Даламбера и Лагранжа. Наиболее широкое обобщение механика твердого тела получила в трудах И. Ньютона, установившего основные законы механики. В механике жидких тел благодаря трудам голландского ученого Стевина, французского философа Паскаля, швейцарских ученых, работавших в России, членов С.-Петербургской академии наук Д. Бернулли и Л. Эйлера были установлены фундаментальные закономерности.

Такое развитие механики не случайно. Мануфактурная промышленность со значительным применением машин помогла проверке и формулировке ряда положений механики. Это, как указывал Маркс, дало великим математикам того времени практические опорные пункты и стимулы для создания современной механики.

Законы механики, распространенные на солнечную систему, привели к замене геоцентрической системы Птолемея гелиоцентрической системой, созданной польским ученым Н. Коперником, подтвержденной трудами немецкого астронома И. Кеплера и обобщенной И. Ньютоном.

Успехи механики были возможны только при одновременном развитии математики, поскольку развитие механики ставило перед математикой все новые задачи. Разрешая эти задачи, математика способствовала дальнейшему раз-

витию механики и развивалась сама. Лейбниц и И. Ньютон разработали дифференциальное исчисление — математический аппарат научных исследований.

Стремление к обобщению накопленного опыта производства привело к зарождению технических наук.

На Руси данные античной науки стали известны еще в XI—XII вв. по ряду переводов с греческого языка.

Преобразования Петра дали прочную базу для развития отечественной науки как в ряде школ технического направления, так и в основанной в 1724 г. в Петербурге Академии наук. Одним из старейших высших технических учебных заведений в России является Горный институт, основанный в Петербурге в 1774 г.

Блестящие успехи механики явились одной из причин укрепления в науке рассматриваемого периода односторонних механических представлений о сущности еще недостаточно изученных явлений и процессов природы. Так, тепловые явления объяснялись наличием особой «жидкости» — теплорода; химические — наличием другой «жидкости» — флогистона¹; электрические — движением особой «электрической жидкости». Такие представления существовали в науке до середины XIX в.

Если практическая теплотехника Начальное развитие плотную подошла к решению проблемы универсального двигателя, то теория учения о теплоте вопроса о превращении тепла в механическую работу значительно отставала. По этому поводу Энгельс писал: «Хотя именно в XVII и XVIII веках бесчисленные описания путешествий кишели рассказами о диких народах, не знавших другого способа получения огня, кроме трения, но физики этим почти совершенно не интересовались; с таким же равнодушием относились они в течение всего XVIII и первых десятилетий XIX века к паровой машине»².

В указанный период исследования тепловых явлений значительно уступали исследованиям в области механики. Теория теплоты находилась еще в зачаточном состоя-

¹ Флогистон (от греческого слова phlogistos, т. е. сжигаемый). Теория флогистона — ошибочная химическая теория, господствовавшая в науке до конца XVIII в. Согласно этой теории процесс горения объясняется выделением из тел флогистона — особой летучей, невидимой материи. Для объяснения причины увеличения веса окислившегося тела флогистону приписывалось свойство обладания отрицательным весом.

² Ф. Энгельс, Дialeктика природы, 1955, стр. 82.

нии. Медленно развивалась термометрия, поскольку еще не существовало различия в понятиях о температуре и количестве тепла, не было представления о теплоемкости.

Первый термометр (вернее, термоскоп, поскольку он не имел шкалы) был продемонстрирован Галилеем в 1657 г. Отто фон Герике предложил для измерения температуры достаточно неопределенные «постоянные» точки: среднюю температуру заморозков и летнюю температуру. Р. Бойль в своей работе «Механическое начало тепла» (1597 г.), представлявший одну из ранних попыток отыскания тепла в движении, высказал убеждение о постоянстве точек плавления всех тел. Ньютон принял за 0° своего термометра с льняным маслом постоянную температуру плавления снега, а в качестве другой постоянной точки взял температуру человеческого тела. Далее, Ньютон устроил первый пирометр, основанный на законе охлаждения нагретого стержня, и открыл зависимость эффекта охлаждения от времени и разности температур охлаждающегося тела и окружающей его среды. Г. Амонтон впервые отчетливо высказал мысль о том, что термометр измеряет не количество тепла, а степень нагретости тел. Свой газовый термометр Амонтон основал на открытой им пропорциональности между упругостью газа и его температурой и в качестве постоянных точек впервые принял точки кипения воды и плавления льда. В 1714 г. Д. Фаренгейт изготовил ртутный термометр с 0° при температуре смеси льда, воды и нашатыря; позднее он ввел точку кипения воды, обозначив ее 212°. Шкала Фаренгейта и поныне употребляется в Англии и США. М. В. Ломоносов в своих исследованиях пользовался шкалой Фаренгейта и шкалой Делиля, а также своей шкалой с 0° при замерзании воды и 150° при кипении ее. Р. Реомюр дал метод градуирования спиртовых термометров с 0° при замерзании воды и 80° при кипении ее. Наконец, в 1742 г. А. Цельсий ввел стоградусную шкалу с 0° при замерзании воды и 100° при кипении ее.

Начало исследованиям в области калориметрии было положено работами Г. В. Рихмана, впервые опубликованными в «Новых комментариях» Петербургской академии. В 1750 г. Рихманом была правильно решена задача о температуре смеси двух различных масс воды m_1 и m_2 при различных температурах t_1 и t_2 и дана общеизвестная формула:

$$t_{\text{см}} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}$$

Позднее Делюк открыл постоянство температуры тающего льда. Химик Д. Блек, проверяя правило Рихмана в условиях смешения воды со льдом, открыл теплоту таяния льда, назвав ее «скрытой теплотой». Позднее он же нашел «скрытую» теплоту парообразования водяного пара. Ученик Блека Ирвин ввел термин «теплоемкость», а в 1784 г. Гадолин ввел термин «удельная теплота».

Калориметрия расширила круг экспериментальных исследований тепловых явлений и вначале явилась опытной поддержкой теории теплорода, послужившей для правильного объяснения распространения теплоты от сред с более высокими температурами к средам с более низкими, составления баланса тепла при его переходе от одного носителя к другому. Последующее более глубокое развитие знаний привело к доказательству несостоятельности теплорода как особой невесомой материи и становлению кинетической теории тепла.

Практика тепловых двигателей вносила свои коррективы в ряд представлений ученых, что особенно отчетливо проявилось в развитии учения о водяном паре. Паровые двигатели, как было показано, начали свое развитие, отталкиваясь от понятия об «упругой силе пара». Однако сведения о природе пара были крайне бедными и неточными. Некоторые ученые, например, принимали пар за воздух, выделяющийся из воды при ее кипячении, причем предполагалось, что вода содержит в себе «неисчислимы» количества воздуха. Отсюда делались такие неверные выводы, что из одного объема воды можно получить 14 000 объемов «воздуха» (вместо 1 700 объемов пара). Подобные неверные положения ученых исправляла практика. Так, например, Т. Ньюкомен и Коули по опыту своих установок утверждали, что «пар восстает путем кипячения воды пропорционально ее количеству». И. И. Ползунов также писал о «парах, из воды восстающих». Расхождение между выводами теории и данными практики становилось все сильнее с развитием последней. В результате широкого распространения парового универсального двигателя начались детальные исследования свойств водяного пара. Тогда же началось исследование и свойств газов.

Кинетическая теория тепла возникла не сразу. Ее проявления видны в трудах ряда ученых, например Ф. Бэкона, Р. Бойля, Х. Гюйгенса. Однако наиболее глубокое и последовательное объяснение ряда тепловых процессов

было сделано М. В. Ломоносовым, решительно отвергшим флюидную теорию тепла и разработавшим первые основы кинетической теории. В своих «Размышлениях о причине теплоты и холода», написанных в 1744 г., Ломоносов утверждает, что «достаточное основание теплоты заключается в движении. А так как движение не может происходить без материи ..., теплота состоит во внутреннем движении материи». Впервые применяя закон сохранения движения к тепловым явлениям, Ломоносов объяснял явление теплообмена тем, что горячие, т. е. быстро движущиеся, частицы передают холодным «часть своего движения; столько же движения уходит от первых, сколько прибавляется у вторых». Отсюда следовало, что «... холодное тело В, погруженное в тело А, очевидно, не может воспринять большую степень теплоты, чем какую имеет А».

Далее, Ломоносов приходит к выводу, что увеличение скорости частиц, а следовательно, и степени нагрева всегда возможно, но «... по необходимости должна существовать наибольшая и последняя степень холода, которая должна состоять в полном прекращении вращательного движения частиц». Так, впервые Ломоносов утверждал существование абсолютного нуля температур. В работе 1748 г. «Опыт теории упругости воздуха» он развивает свою теорию теплоты и основы молекулярно-кинетической теории газов и дает картину молекулярного движения, получившую всеобщее признание только в середине XIX в. В «Прибавлениях к размышлениям об упругости воздуха» Ломоносов, учитывая собственный объем молекул, показал, что при большом сжатии «отношение упругостей воздуха должно отличаться от отношений плотностей». Это положение также стало общепризнанным только через столетие.

Исследования Ломоносова по теории теплоты были высоко оценены Эйлером, который писал об этих работах: «Все сии сочинения не токмо хороши, но и превосходны, ибо изъясняют физические и химические материи самые нужные и трудные, кои совсем неизвестны и невозможны были к истолкованию». Труды Ломоносова по теории теплоты подняли ее на новую ступень развития, отделив подлинное познание от надуманных выводов, показав, что «... теплотворная особливая материя ... есть только один вымысел». Развивая теорию теплоты, Ломоносов пришел к утверждению закона сохранения материи и движения.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В ПЕРИОД ГОСПОДСТВА УНИВЕРСАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

РАЗВИТИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

3-1. ПРОМЫШЛЕННЫЙ ПЕРЕВОРОТ XVIII в. И ЕГО РАЗВИТИЕ

Промышленный
переворот XVIII в.,
его техническое
содержание
и вызвавшие
его причины

Промышленный переворот — это замена ручного ремесленного и мануфактурного производства машинным фабрично-заводским производством.

Ремесленное и мануфактурное производство до промышленного переворота было ручным. Это не означает, что до промышленного переворота никакие машины в производстве не применялись. Транспортные машины получили применение еще до нашей эры. В феодальный период достаточно широкое распространение приобрели энергетические машины — водяные колеса и тепловые двигатели частного, специального назначения (преимущественно для откачивания воды).

Что касается технологических машин, то вопрос об их применении до промышленного переворота и их роли в последнем следует рассмотреть подробнее.

Сильнее всего был развит 1-й класс технологических машин (см. стр. 36), представляющий собой выросшее по размерам и видоизмененное ручное орудие. Начиная с 2-го класса технологических машин. Как указывалось выше (см. гл. 1), машины этого класса «берут» инструмент из рук рабочего. До промышленного переворота технологических машин 2-го класса было немного. Это прежде всего так называвшиеся «пильные мельницы» —

лесопильные устройства (см. рис. 2-29), включающие в себя не одну, а ряд пил: лесопильные «рамы».

Технологические машины 3-го класса хотя и получили достаточно широкое применение, но оставались машинами, не заменявшими технологические производственные функции человека, а только помогавшими ему. Так, ткацкий станок оказывал громадную помощь ткачу, поскольку в нем был рационально организован ряд движений нитей основы, осуществлявшийся от ног ткача, которые выполняли роль двигателя. Но перемещение челнока с нитью утка осуществлялось вручную. Прядильный станок также помогал рабочему, скручивая и наматывая нити, но основная операция прядения — образование нити из исходного материала (хлопка, шерсти, льна) — выполнялась пальцами прядильщика.

Так обстояло дело в технологических процессах, в которых орудием все еще служили умелые руки рабочего.

Очевидно, что технологические машины 1-го класса не могли заменять рабочего. Они лишь вызвали к жизни другие машины — энергетические, прежде всего водяные колеса. Переход к машинному способу производства начал осуществляться с того времени, когда появилась возможность замены рабочего технологическими машинами 2-го и 3-го классов; одни из них (2-й класс) «взяли» из рук рабочего инструмент, орудия, соответственно выросшие и видоизмененные, другие (3-й класс) стали осуществлять технологические операции, выполнявшиеся ранее только руками, без инструмента, без орудия.

Промышленный переворот начался с возникновения и внедрения в производство технологических машин 3-го класса и лишь затем начали получать развитие машины 2-го класса. Внедрение в промышленность технологических машин прежде всего поставило вопрос об их приводе, осложнявшийся тем, что значительно возросло количество технологических машин с вращательным движением приводящего механизма (при любой форме движения рабочего инструмента). Для ткацких станков с возвратно-поступательным движением челнока, для прядильных станков с возвратно-поступательным движением вытягивающего нить инструмента, для строгальных станков с возвратно-поступательным движением стола и для множества других технологических машин привод в движение осуществлялся через приводной вал с вращательным движением. Так, в процессе промышленного переворота к тепловому двига-

телю, ранее решившему задачу независимости от локальных условий, добавилось требование универсальности в техническому применению. Методы достижения универсальности по техническому применению были описаны в предыдущей главе.

В. И. Ленин в своей работе «Развитие капитализма в России», показывая соответствие техники как докапиталистическому укладу, так и отдельным стадиям развития капиталистического уклада, писал: «Мелкое товарное производство характеризуется совершенно примитивной, ручной техникой, которая оставалась неизменной чуть ли с незапамятных времен. Промышленник остается крестьянином, перенимающим по традиции приемы обработки сырья. Мануфактура вводит разделение труда, вносящее существенное преобразование техники, превращающее крестьянина в мастерового, в «детального рабочего». Но ручное производство остается, и на его базисе прогресс способов производства неизбежно отличается большой медленностью. Разделение труда складывается стихийно, перенимается также по традиции, как и крестьянская работа. Только крупная машинная индустрия вносит радикальную перемену, выбрасывает за борт ручное искусство, преобразует производство на новых, рациональных началах, систематически применяет к производству данные науки»¹.

Наша задача состоит в том, чтобы рассмотреть исторический процесс перехода от ручного труда к машинному, составлявший техническое содержание промышленного переворота.

Процесс этого перехода происходил не одновременно в различных странах. Ранее всего он начался в Англии, где сложились наиболее благоприятные условия для его возникновения. Достаточно быстро промышленный переворот происходил в странах Западной Европы. В России, где царил крепостное право, промышленный переворот начался позднее и также сыграл значительную роль в ускорении распада феодальных отношений.

Первый этап
промышленного
переворота

В середине XVIII в. Англия вышла победительницей в многовековой борьбе ряда европейских стран за колони-

альное господство, присоединив к своим обширным заморским владениям многие испанские, французские и голландские колонии. Эта победа привела к громадному развитию

колониальной торговли Англии, росту плантаторского хозяйства, усилению финансовой деятельности банков и бирж и к колоссальному увеличению спроса на промышленные товары. Потребность в промышленных товарах возрастала настолько быстро, что мануфактурное производство, несмотря на значительное увеличение его масштаба, не было в состоянии удовлетворять эту потребность.

Следует напомнить, что до промышленного переворота и развития машинного производства со всеми его последствиями структура промышленной продукции коренным образом отличалась от современной. Если в современном выпуске промышленной продукции преобладают средства производства, являющиеся основой машинной индустрии, а объем продуктов народного потребления занимает меньшую долю, то до промышленного переворота, когда средства производства представляли собой преимущественно ручные орудия и инструменты, решительно преобладающая по своему объему доля промышленной продукции падала на продукты потребления: одежду, ткани, обувь, утварь и т. п. В Англии рассматриваемого периода наиболее развитой отраслью промышленного производства являлась текстильная промышленность, на которой прежде всего отразилось все обострявшееся несоответствие между возросшей потребностью в тканях и возможностью удовлетворения этой потребности методами ручного мануфактурного производства. Поэтому именно в текстильной промышленности впервые начали проявляться элементы перехода от ручного труда к машинному.

Основные технологические процессы текстильного производства — прядение и ткачество — осуществлялись непосредственно руками рабочего, без применения орудия или инструмента. Поэтому здесь возникла задача замены рук рабочего, перемещавших челнок в процессе ткачества, и пальцев рабочих, вытягивавших и скручивавших нить в процессе прядения.

Вместе с возникновением и обострением проблемы машинного прядения и ткачества как замены рабочего в выполнении этих производственных функций возникла и материальная возможность для ее решения. Эта возможность заключалась в том, что в процессе многовекового развития методов производства тканей и пряжи для них были разработаны технологические прядильные и ткацкие машины — ручные прялки и ручные ткацкие станки, в значительной степени помогавшие рабочему. Оставалось осуще-

¹ В. И. Ленин, Соч., изд. 4-е, т. 3, стр. 477.

ствить последний шаг в эволюции этих машин, превратит их из машин помогающих в машины, заменяющие рабочего. Для этого в ткацких машинах нужно было ручное перемещение челнока заменить механическим, а в прядильном станке — осуществить механическую вытяжку и кручение нити.

Именно с этого и начался промышленный переворот.

В 1733 г. английский механик и ткач Дж. Кей предложил ткацкий станок с «самодвижущимся челноком», перемещаемым пока еще руками рабочего, но по строгой траектории, определяемой механизмом ткацкого станка. Челнок Кей позволял изготавливать ткань более широкую, так как здесь ширина ткани не ограничивалась размахом руки ткача; кроме того, процесс ткачества значительно ускорился. Изменился и труд ткача, ставшего живым двигателем. Возросшая производительность ткацкого производства вызвала острый дефицит в пряже. Проявилось характерное противоречие, когда прядение стало тормозить развитие ткачества, а ткачество стимулировало развитие прядения и ставило вопрос о необходимости повышения его производительности, что могло быть достигнуто только путем перехода к машинному прядению.

Эта задача была впервые разрешена в 1738 г. изобретением прядильной машины, в которой операция вытяжки нити производилась уже не пальцами рабочего, а несколькими парами вращающихся валиков. Возникшее отставание ручного процесса чесания хлопка было преодолено постройкой в 1748 г. чесальной (кардной) машины, заменившей ручной труд на этой операции.

В 1768 г. английским механиком-ткачом Харгривсом была сооружена более производительная прядильная машина, названная им «Дженни». «Двигателем» этой машины служил человек. Одной рукой он передвигал каретку (рис. 3-1), которая несла на себе ряд брусков, заменивших пальцы прядильщика. Эти бруски захватывали и вытягивали хлопок в нити. Другой рукой рабочий вращал рукоятку машины, приводя в движение ряд вертикальных веретен, осуществлявших скручивание нити. Так, разделив на две отдельные операции вытяжку и кручение нити, выполнявшиеся ранее пальцами прядильщика, Харгривс заменил их 2 комплектами инструментов: брусками для вытягивания и веретенами для скручивания.

Применение прядильной машины резко повысило производительность труда. Она теперь зависела не только от

замены пальцев брусками и веретенами, не знающими усталости, но и от того, что одна рука прядильщика (попытки прядения одновременно двумя руками оказались неудачными) была заменена несколькими комплектами искусственных «пальцев» (на рис. 3-1 показаны 16 комп.).

Таким образом, ставший на место искусного прядильщика неквалифицированный рабочий, выполнявший эле-

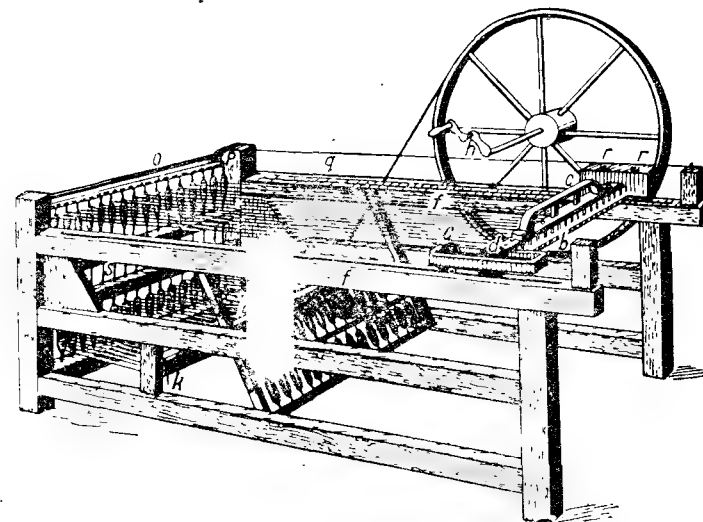


Рис. 3-1. Прядильная машина «Дженни» (1768 г.).

b, c, d — перемещаемый от руки по рельсам пресс с зубьями; *f* — прямоугольная станина; *h* — маховое колесо с рукояткой для привода барабана и веретен; *s* — вертикальная рама с веретенами, приводимыми во вращение от колеса *h*; *i* — наклонная рама с катушками ровницы или лент хлопка.

ментарную функцию двигателя, вырабатывал в несколько раз больше пряжи.

С распространением ткацких и прядильных машин возник вопрос о приведении их в движение. Ручной привод очень скоро уступил свое место конному, а позднее — и энергии неорганической природы. В 1769 г. Аркрайт был запатентован в Англии прядильная машина с большим количеством веретен и приводом от водяного колеса, сохранившая и поныне в названии отзвук своего происхождения: «ватер-машина» («ватер» — вода). Позднее было обнаружено, что Аркрайт (по профессии парикмахер) никогда не изобретал «ватер-машин», а присвоил чужое изобретение. Это привело в 1785 г. в результате судебного разбирательства к лишению Аркрайта права на англий-

ский патент. Маркс, описывая историю возникновения машинного производства, справедливо назвал Аркрайта самым низким субъектом и вором чужих изобретений. Однако усилиями этого ловкого дельца, оставившего после себя громадный капитал, прядильные машины с водяным приводом получили самое широкое распространение. Так, например, в южной части графства Ланкастер, где реки еще с давних пор использовались для приведения в движение мельниц, к 1788 г. уже насчитывалось свыше 40 прядилен с машинной технологией и приводом от водяных колес.

Повышение производительности труда с внедрением машинного прядения и ткачества, особенно после того, как стали применяться более совершенные прядильные (Кромптон) и ткацкие (Картрайт) машины, ставило вопрос о ответственном повышении производительности труда в смежных процессах текстильного производства. Поэтому в течение последней четверти XVIII в. в Англии были созданы технологические машины для замены ручного труда при очистке хлопка, его чесании, при изготовлении пряжи.

Потребовалось повышать производительность труда и в отделочных операциях, главным образом в белении и крашении. Старый способ беления на солнце был малопродуктивен, и на смену ему пришли процессы химической технологии, чему способствовали успехи химии. Открытие в 1775 г. хлора шведским химиком Шееле и разработка в 1785 г. французским химиком Бертолле способов применения хлора для беления тканей привели к предложению английским химиком Тенантом эффективного метода беления тканей белильной известью, получасмой действием хлора на гашеную известь. Этот метод удерживался в производстве более столетия.

Необходимость сооружения большого числа машин, строившихся уже не для каждого конкретного промышленного объекта, а на рынок и ставших товаром, привело к возникновению машиностроения как новой отрасли промышленного производства; зарождалось *производство средств производства*. В связи с этим понадобились машины для постройки машин. Возможность удовлетворения этой потребности уже имелась в результате длительного процесса развития методов обработки металлов (в гл. 2 показано, как постепенно складывался суппорт — механическая «рука», воспринявшая инструмент из рук рабочего).

Естественно, что технологические машины 2-й группы, на долю которых была возложена задача во все большем количестве готовить полуфабрикаты промышленного производства, также не остались вне сферы промышленного переворота.

Следовательно, первая фаза промышленного переворота коснулась всех групп технологических машин, являясь по своей сущности заменой рабочего машинами в выполнении им технологических функций производства. Промышленный переворот захватывал одну область производства за другой, сфера промышленного производства расширялась, возникало крупное машинное производство с большим количеством наемных рабочих. Тонкая нить, вышедшая из механического прядильного станка, потянула за собой бесконечную цепь глубочайших технических, экономических и социальных преобразований.

Второй этап промышленного переворота

Широкое распространение технологических машин сделало совершенно неизбежным осуществление второй фазы промышленного переворота — внедрения в производство универсального двигателя.

В гл. 2 дано определение универсального двигателя по его основным признакам: малой зависимости от локальных условий и универсальности по техническому применению. Если первые насосные установки, в которых для получения тепловой энергии использовалось энергоемкое топливо, решили задачу малой зависимости от локальных условий, то универсальность по техническому применению после первого этапа промышленного переворота приобрела иной характер.

Уже на примере одной из первых прядильных машин «Дженни» было видно, что рабочее движение частично передавалось машине от двигателя во вращательной форме. Применение водяного колеса в «ватер-машине» закрепило вращательную форму движения привода настолько, что ко многим технологическим машинам с поступательным рабочим движением (как, например, строгальные станки) рабочее движение поступало тоже на вращающийся вал.

Далее, если старые машины (песты, молоты и т. п.), получавшие движение от вращающихся валов водяных колес, были тихоходными и обладали неравномерным ходом, то новые машины, особенно прядильные и ткацкие, требовали от приводящего двигателя вращательного движе-

ния с большим числом оборотов. Только это могло обеспечить достаточную производительность станков и повысить степень равномерности, чтобы не допускать разрыва такого непрочного материала прядельного и ткацкого производства, как хлопчатобумажная, шерстяная или льняная нить.

Таким образом, характеристика «универсальности по техническому применению» в процессе развития первой фазы промышленного переворота приобрела новые конкретные черты: универсальный двигатель должен был отдавать работу в форме однонаправленного, непрерывного и равномерного вращательного движения. Требование к двигателю такого типа было настолько острым, что один из первых заводчиков по производству паровых двигателей Болтон писал своему компаньону—изобретателю Уату, что «... в Лондоне, Манчестере, Бирмингеме все без ума от машин с вращательным движением».

В этих условиях неизбежно должны были разрабатываться конструкции двигателей, способных удовлетворить назревшим требованиям производства. Десятки конструкторов и изобретателей, рассчитывая на громадные барыши от изобретения универсального двигателя, стремились прежде всего приспособить освоенный многолетней практикой двигатель Ньюкомена для равномерного вращения шкивов прядельных и ткацких станков. Был использован весь арсенал техники, особенно техники передаточных механизмов, хорошо разработанных в практике привода от водяных колес. Были испытаны все методы, дававшие возможность преобразовать работу поступательного движения поршня в работу вращательного движения вала (см. гл. 2).

Самыми ранними и наименее целесообразными были многочисленные попытки применения потенциального механического аккумуляирования при помощи груза.

Очевидные недостатки этого способа — тихходность и неравномерность — ограничили попытки постройки подобного рода двигателей единичными случаями.

Гораздо целесообразнее были двигатели с применением кинетического аккумуляирования как в «чистом» виде, так и в комбинации с потенциальным аккумуляированием или суммированием работы нескольких полостей двигателя.

Комбинированное (потенциальное с кинетическим) аккумуляирование было успешно использовано в Англии в 70-х годах XVIII в. для привода шахтных вентиляторов. В этом двигателе (рис. 3-2) только половина работы, раз-

виваемой опускающимся поршнем, передавалась коренному валу, несущему маховик; вторая половина расходовалась на подъем тяжелого литого шатуна. Опускаясь вниз, шатун отдавал аккумуляированную в нем половину работы рабочего хода вала двигателя и одновременно поднимал вверх поршень, обеспечивая поступление пара в полость цилиндра. Таким образом, первый из двух аккумуляторов

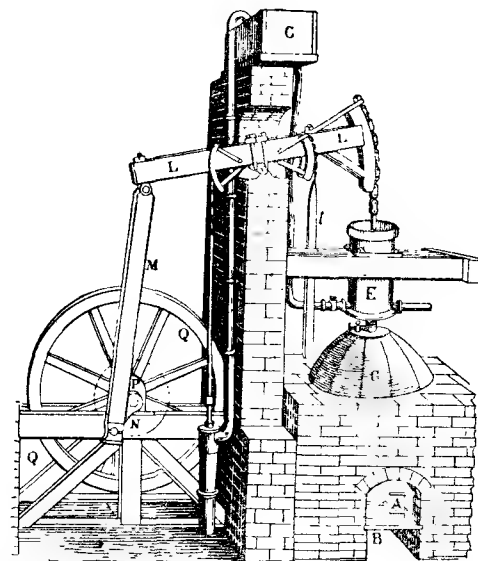


Рис. 3-2. Паровая универсальная установка, основанная на комбинировании грузового и кинетического аккумуляирования механической энергии.

работы — потенциальный аккумулятор (тяжелый шатун) — позволял передавать работу вала двигателя непрерывно как во время опускания, так и во время подъема поршня двигателя. Неравномерность вращающего момента на валу двигателя выравнивалась вторым, кинетическим аккумулятором — маховиком, насаженным на вал двигателя. Первое решение задачи об универсальном двигателе, когда налицо имелись потребность в нем и возможность ее удовлетворения, было найдено так просто, что описанный двигатель не был даже запатентован.

Суммирование работы двух цилиндров пароатмосферного двигателя с кинетическим аккумуляированием ском-

бинировал в своем универсальном двигателе Томсон (рис. 3-3). Здесь поршни цилиндров *E* и *F* закреплены на общем вертикальном штоке, и поэтому рабочее движение штока непрерывно: работа передается балансиру *L—L* двигателя как при движении штока вверх (работает верхний цилиндр), так и при движении штока вниз (работает нижний цилиндр). Непрерывная, но неравномерная работа, передаваемая валу шатуном *M*, преобразующим качательное движение во вращательное, выравнивается маховиком *Q*.

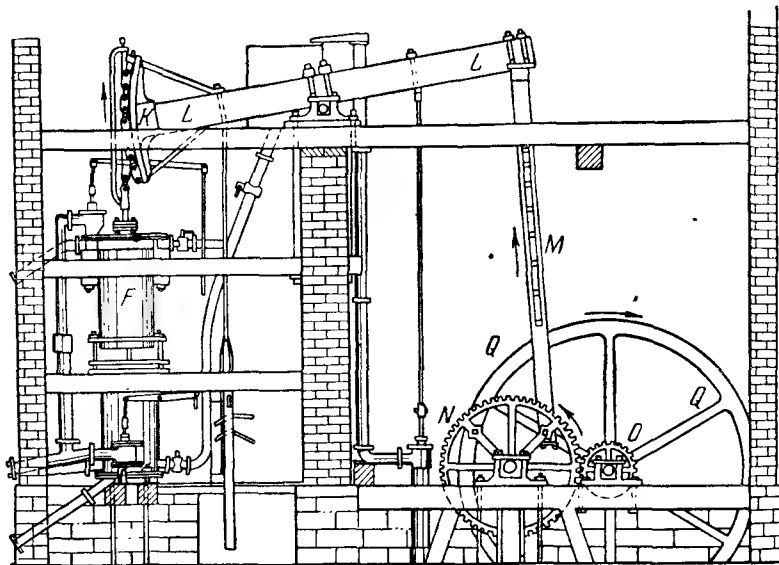


Рис. 3-3. Двигатель Томсона с ускоренным вращением маховика.

виком *Q*. Так как выравнивающее действие маховика при неизменных массе и радиусе зависит от квадрата числа оборотов, Томсон в 9 раз увеличил эффективность маховика, втрое увеличив число оборотов маховичного вала введением зубчатой передачи (шестерни *N* и *O* втрое увеличивают число оборотов маховика *Q*).

В «чистом» виде кинетическое аккумулирование было применено в двигателе Картрайта (рис. 3-4). Рабочий цилиндр *E* находится на одной оси с цилиндром насоса *H*, откачивающего воздух из конденсатора. Шатуны *M* и *K* через кривошипы приводят шестерни *N—N*, а шестерня *O* втрое увеличивает число оборотов маховика *Q*. Его одно-

цилиндровый двигатель простого действия был объединен с вакуумным насосом конденсатора общим штоком. Пар избыточного давления двигал поршень вниз, осуществляя рабочий ход. При холостом ходе вверху, осуществлявшемся за счет инерции маховика, пар через клапан в поршне перепускался в нижнюю полость цилиндра, откуда он отсасывался насосом. Равномерное движение обеспечивалось маховиком, для увеличения эффективности которого Карт-

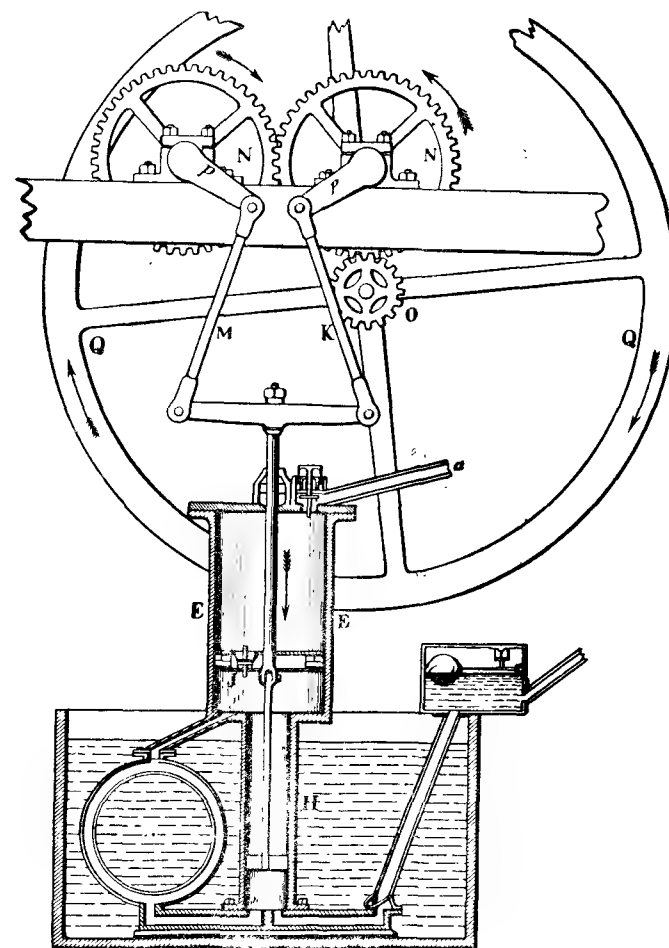


Рис. 3-4. Двигатель Картрайта с ускоренным вращением маховика.

райт втрое увеличил число оборотов маховичного вала введением зубчатой передачи.

В двигателе Фалька (рис. 3-5) было осуществлено суммирование работы двух цилиндров (как в двигателе Ползунова). Непрерывное качательное движение затем преобразовывалось во вращательное посредством шатунно-кри-

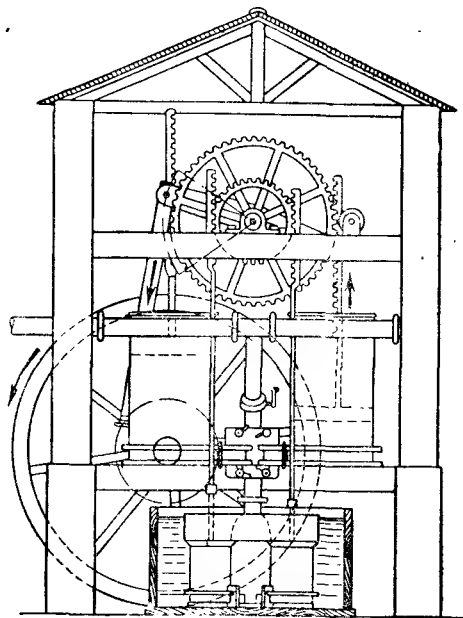


Рис. 3-5. Двигатель Фалька, суммирующий работу двух цилиндров.

вошипного механизма, а неравномерность сглаживалась в нужной степени введением массивного маховика. Конструктивные формы двигателя Фалька показывают, что в двигателе Ползунова была заложена возможность легко получить вращательное движение, применив повсеместно известный тогда шатунно-кривошипный механизм.

Промышленный переворот привел к тому, что в короткий исторический период — за последнюю четверть XVIII в. — в одной только Англии было выдано свыше десятка патентов на универсальные двигатели самых разнообразных систем и конструкций. Еще раз подтвердились слова Маркса: «Критическая история технологии вообще

показала бы, как мало какое бы то ни было изобретение XVIII столетия принадлежит тому или иному отдельному лицу»¹. Однако участники изобретения универсального двигателя, чьи упорные труды стимулировались нуждами промышленного производства, оказались забытыми. Обширная литература по истории паровых двигателей до самого последнего времени выделяла из числа изобретателей универсального двигателя одного Д. Уатта.

Это имеет свои причины. Первая причина состоит в том, что Уатт и его компаньон заводчик М. Болтон, запатентовав такие широкие приемы применения пара, как конденсацию в отдельном конденсаторе и применение избыточного давления, крайне ограничили возможности других изобретателей. Фирмой «Уатт и Болтон» был опротестован патент на двигатель без балансира только потому, что в этом двигателе предполагалось применить избыточное давление пара. Патент Булля с кривошипным механизмом и патент Горнблауэра, в котором впервые предлагалось последовательное расширение пара в двух цилиндрах (двойное расширение), были опротестованы также на том основании, что изобретатель применил избыточное давление пара, которое, кстати сказать, впервые предложил применять Я. Леупольд еще в 1724 г. Неслучайно автор английской книги по истории парового двигателя, вышедшей в 1939 г., Дикинсон писал, что «...Подобная политика в течение долгого срока действия патентов Уатта (с 1769 по 1800 г.) (т. е. 31 год — авт.), вне всякого сомнения, толкала назад развитие паровой машины».

Вторая причина столь большой известности Уатта состояла в том, что его двигатель, будучи равноценным с другими в отношении универсальности по техническому применению, был вдвое экономичнее по расходу топлива благодаря отделенному конденсатору. Экономичность двигателя и коммерческий талант заводчика Болтона сделали Уатта одним из наиболее популярных изобретателей в мире.

Уатт начал свою работу в 1763 г. почти одновременно с Ползуновым, но с иным подходом к проблеме двигателя и в совершенно другой обстановке. Ползунов начинал с общенергетической постановки задачи о полной замене зависящих от локальных условий гидросиловых установок универсальным тепловым двигателем, но не смог реализо-

¹ К. Маркс, Капитал, т. 1, стр. 378, 1953.

вать свои смелые планы в крепостной России. Уатт начал с частной задачи — повышения экономичности двигателя Ньюкомена, возникшей в связи с порученной ему как механику университета в Глазго (Шотландия) работой по починке действующей модели водоотливной паровой установки Ньюкомена.

Эта модель сыграла значительную роль в деятельности Уатта, так как помогла ему увидеть недостатки установки Ньюкомена и найти способы их устранения. Это произошло потому, что, будучи геометрически подобна своему промышленному образцу, модель не являлась подобной по протекавшим в ней механическим и тепловым процессам. Достаточно рассмотреть условия механического подобия, для того чтобы убедиться в полной неработоспособности модели. Механическое подобие предусматривает равенство числового значения критерия гомохронности Ho в образце и модели, т. е. определяется, наряду с другими условиями, уравнением

$$Ho_{обр} = Ho_{мод},$$

или

$$\frac{\omega t}{l} = \frac{\omega' t'}{l'},$$

где ω , t и l и ω' , t' и l' — скорость, время и линейные размеры образца и модели.

Из приведенных уравнений следует, что для сохранения механического подобия при одном и том же времени цикла

$$t = t'$$

скорость движения поршня в модели должна быть меньше скорости движения поршня в образце во столько же раз, во сколько линейные размеры модели меньше аналогичных размеров образца.

Скорость является функцией разности давлений над и под поршнем двигателя, сравнительно мало отличающейся в модели по сравнению с образцом. Кроме того, в модели не была осуществлена такая же высота подъема воды, какую обеспечивала машина Ньюкомена (примерно 80 м). Подобное нарушение условий подобия неизбежно приводило к более быстрому, чем в образце, движению поршня, что при малых размерах модели в свою очередь резко увеличивало число циклов двигателя в единицу времени. В результате этого после пуска модели поршень делал несколько быстрых ходов и затем останавливался из-за недостатка пара. Уатт, изучавший работу модели, усмотрел причину недостатка пара не в нарушении правил подобия, а в несоответствии между паропроизводительностью котла и потреблением пара машиной. Поскольку увеличение относительных размеров котла означало отход от геометрического подобия образцу, который никогда

* Это равенство необходимо для выполнения равных условий по объему пара, идущего из котла на заполнение цилиндра, при сохранившемся в силу геометрического подобия отношении объемов котла и цилиндра.

не останавливался из-за недостатка пара, то Уатт все свое внимание направил на изыскание способов уменьшения потребления пара машиной.

Так определилась основная линия всей деятельности Уатта в области сооружения паровых двигателей. Та же модель дала ему возможность найти решение возникшей задачи. Цилиндр модели был наполнен из тонкой латуни, тогда как в двигателе Ньюкомена применялись толстые чугунные стенки. Модель наглядно показала Уатту резкие колебания температуры в полости цилиндра по нагреву и охлаждению стенок. Уатт поставил перед собой задачу создать такой двигатель, цилиндр которого был бы «всегда горячим». После 5 лет упорной работы (в 1769 г.) он пришел к отделенному от цилиндра конденсатору — охлаждаемому водой сосуду, в котором происходит конденсация пара. Применение конденсатора настолько снизило расход пара, что даже модель, нарушавшая правила подобия, стала работоспособной.

В 1769 г. Уатт запатентовал паровой двигатель с отдельным конденсатором. Теперь конструкция парового двигателя содержала все основные элементы: паровой котел, цилиндр, конденсатор. Отделение конденсатора явилось существенным шагом в поисках путей снижения расхода топлива, но не разрешило основную задачу того времени — получение непрерывного вращательного движения; универсальный двигатель с таким движением может работать и без конденсатора.

Благоприятные условия деятельности Уатта — денежная поддержка капиталистов, общение с учеными, поддержка в парламенте и, наконец, возможность использования высококвалифицированных инженерных кадров — позволили ему осуществить ряд ценных мероприятий, резко повысивших экономичность парового двигателя. Главными из этих мероприятий являлись: введение паровой рубашки, уменьшавшее температурные колебания стенок цилиндра и потерю пара от конденсации на них, и расширение пара в полости цилиндра.

Расширение пара (правда, очень незначительное) применялось уже в двигателях Ньюкомена, где оно являлось следствием прекращения впуска пара при подходе поршня к мертвому положению во избежание резких толчков. Уатт, которому шахтовладельцы по договору выплачивали $1/3$ прибыли, получаемой от экономии топлива в насосных двигателях с отдельным конденсатором (рис. 3-6), исследовал экономический эффект более раннего прекращения впуска пара в цилиндр и запатентовал расширение пара на значительной доле хода поршня. Это резко снижало удельный расход пара. Стремясь компенсировать потерю мощности, вызванную отсечкой пара, без увеличения раз-

меров цилиндра, Уатт предложил впускать пар во вторую полость цилиндра. Таким путем он пришел к двигателю двойного действия, в котором осуществляется один из методов суммирования работы полостей.

Теперь уже не составляло особого труда построить двигатель с вращательным движением: нужно было только применить маховик для достижения равномерности вра-

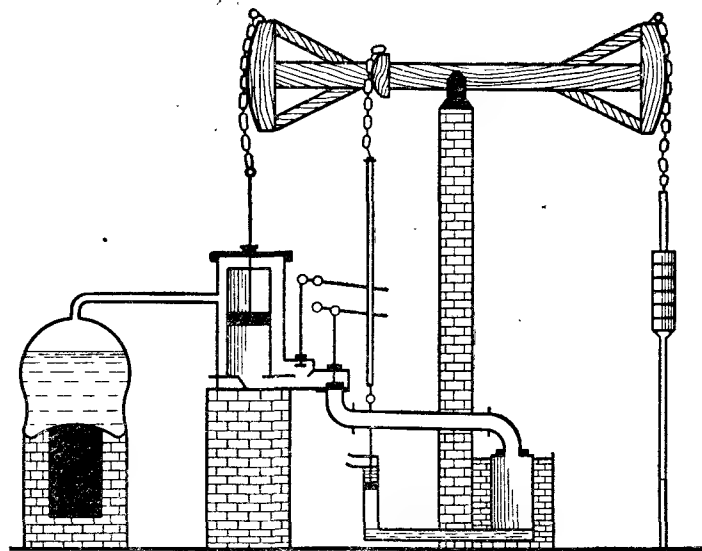


Рис. 3-6. „Усовершенствованная“ машина Ньюкомена по патенту Уатта с отделенным конденсатором.

щающего момента. Уатт писал, что применить кривошипно-шатунный механизм к «...паровой машине было так же легко, как воспользоваться ножом, предназначенным для резки хлеба, для разрезания сыра». Но здесь Уатт столкнулся с людьми, умевшими не хуже его самого патентовать давно известные изобретения. Подобно тому как он в своем патенте 1769 г. запатентовал избыточное давление пара, предложенное Леупольдом в 1724 г., два «изобретателя» сумели получить в 1779 и 1780 гг. патенты на давно известный технике шатунно-кривошипный механизм.

Обходя эти патенты, Уатт применил планетарную передачу (рис. 3-7), используя ее свойство вдвое увеличивать число оборотов вала, что приводит к четырехкратному увеличению выравнивающего действия маховика.

Уатт не мог отказаться от балансира и применил соединение его со штоком двигателя при помощи параллелограмма, теория которого была разработана значительно позднее П. Л. Чебышевым.

Наконец, Уатт ввел центробежный регулятор скорости, изменявший сечение паропровода и, следовательно, подачу пара к двигателю при изменении числа оборотов вала. Так же как и регулятор уровня воды в котле Ползунова, этот регулятор явился одноимпульсным механическим регулятором простого действия с одним регулируемым па-

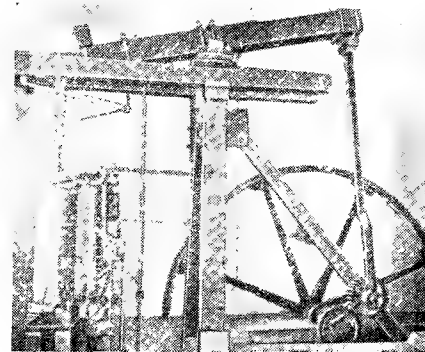


Рис. 3-7. Универсальный паровой двигатель Уатта.

раметром. Теория центробежных регуляторов была разработана И. А. Вышнеградским только в 1877 г.

Двигатели Уатта начали решительно вытеснять водяное колесо. Если за 70 лет до 1769 г. было установлено около 140 паронасосных установок, из которых около 100 работали по откачке воды на рудниках и шахтах, а остальные — в водопроводных схемах различного назначения (городские, промышленные, парковые), то, начиная с 1775 г., количество паровых установок резко возрастает. Вначале все еще преобладали насосные установки. Из 66 сооруженных установок 34 предназначались для целей водоподъема. В 17 установках двигатели прерывного действия применялись для привода воздухоудных установок доменных и кузнечных цехов. Остальные 15 представляли собой либо установки непрерывного действия с комбинированным аккумулярованием (см. рис. 3-2), либо единичные установки других типов с вращательным движением и два двигателя Уатта.

Дальнейшая картина первых шагов мировой теплоэнергетики показана в таблице.

Годы	Число установок			Средняя мощность, л. с.	Рост средней мощности, %
	шт.	%			
		насосных	универсаль- ных		
1785—1795	144	22,9	32,6	13,9	100
1795—1800	76	8,8	54,4	16,7	120

Примечание. Остальные установки (до 100%) — ненасосные, частного назначения, преимущественно воздуходувные.

Развитие промышленного переворота

Не останавливаясь на известных политических следствиях промышленного переворота, заключающихся в становлении капиталистических отношений, обратимся к техническим сторонам его развития, обращая главное внимание на пути развития энергетики. Эти пути были неразрывно связаны с коренной технической реконструкцией ранее существовавших отраслей промышленности — горнорудного дела и металлургии — и возникновением новых отраслей, главным образом машиностроения.

Развитие горнорудной промышленности и металлургии предъявило к энергетике новые требования. Если в начале XVIII в. стоял вопрос о замене конных приводов и водяных колес паровым двигателем, не зависящим от локальных условий, то теперь двигатель должен был приводить в движение новый парк исполнительных машин, отличавшийся от старого как по потребляемой мощности, так и по принципам действия. Возможности, заключающиеся в паровом двигателе, заставили конструкторов и изобретателей пересмотреть существовавшие насосы, воздуходувки, подъемники, вентиляторы, транспортные установки. Кличатые воздуходувные мехи с кожаными стенками стали решительно заменяться цилиндрическими поршневыми воздуходувками, позволявшими подавать большее количество воздуха с более высоким напором. Насосы простого действия, малопроизводительные и тихоходные, стали вытесняться насосами двойного действия, а позднее им на смену пришли центробежные насосы. Мощность парового двигателя позволила значительно увеличить также производительность подъемных устройств как за счет величины поднимаемого груза, так и за счет быстроты подъема.

В металлургической промышленности рост величины и производительности доменных печей теперь в значительной степени зависел от паровых машин, приводящих в действие более производительные воздуходувки. Мощный паровой двигатель, заменив водяное колесо у прокатных станков, внес существенную реконструкцию в технику проката сортового и профильного металла.

Машиностроение, получившее более качественный металл благодаря внедрению пудлингования и изготовлению тигельной стали, решительным образом встало на путь изготовления машин, делающих новые машины. Для этой цели прежде всего были разработаны конструкции металлообрабатывающих станков — технологических машин 2-го класса, которым был передан инструмент из рук рабочего. Объединение этого класса технологических машин с энергетикой нового парового универсального двигателя впервые привело к «развитой совокупности машин» (Маркс).

Совокупность машин, состоящая из двигателя, передаточного механизма и рабочей машины, применялась и с водяным колесом, приводившим в движение простейшие технологические машины 1-го класса: песты, жернова, мешалки, дробилки, молоты и т. п. Эта совокупность была еще мало развита. Она развилась с применением паровой машины, причем громадную роль при этом сыграла возможность увеличения единичной мощности парового двигателя, поскольку мощный двигатель экономичнее маломощного. Увеличение разницы между мощностью парового двигателя и мощностью технологических машин привело к применению группового привода, ставшего технической основой промышленного предприятия нового типа — *завода* или *фабрики*. Так возникла описанная Марксом «развитая совокупность машин».

На рис. 3-8 представлена схема промышленного предприятия, являвшаяся наиболее характерной для машинного производства до внедрения электрификации промышленности. На схеме отчетливо видны три основных звена «развитой совокупности машин»: «машина-двигатель» — заводская теплосиловая установка, состоящая из котельной и машинного зала, «передаточный механизм» — система трансмиссий, распределяющих энергию по станкам завода, и «рабочие машины» — станки. Энергоснабжение предприятия осуществляется путем подвоза энергоемкого носителя энергии — топлива — на топливный склад 1, затем в котельную 2, кузнечный цех 5 (для горнов) и в литейный

цех 6 для плавильных печей. Пар из котельной идет в машинное отделение 3, а также на питание паровых молотов в кузнечном цехе 5. Механическая работа паросиловой установки ведется через систему трансмиссий станкам 4

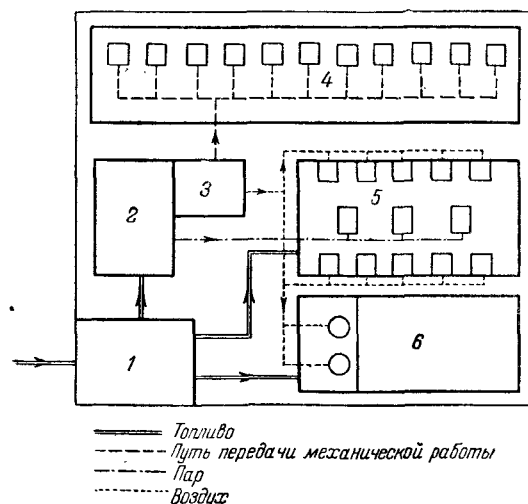


Рис. 3-8. Схема промышленного предприятия доэлектрического периода.

и приводит в действие воздуходувное устройство для снабжения сжатым воздухом горнов и плавильных печей.

Представленная схема показывает техническое решение, оставшееся наилучшим в течение длительного времени. Позднее, к 80-м годам XIX в., эта схема перестала удовлетворять потребности растущего производства и была заменена новой (см. гл. 6).

3-2. РАЗВИТИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ ПОСЛЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПЕРЕВОРОТА

Общие тенденции развития теплоэнергетики в XIX в.

Эволюция машинного производства в течение XIX в. проходила под знаком постоянно усиливавшейся капиталистической концентрации производства, сопровождавшейся технической концентрацией. Последняя выражается прежде всего в укрупнении производственных единиц машинного производства — заводов и фабрик. Отсюда воз-

никают два основных требования, предъявляющихся к силовым фабрично-заводским установкам: увеличение единичной мощности теплосиловых установок и увеличение их экономичности. Эти два требования, выражавшие главную тенденцию развития теплоэнергетики в течение XIX в., вызвали существенное изменение единичной мощности и экономичности теплосиловых установок. Единичная мощность теплосиловых установок возросла с 10—20 до 10 000—15 000 л. с. Экономический к. п. д.¹ вырос от среднего значения порядка 5% до 15%. Приведенные изменения мощности и экономичности явились неизбежным следствием быстрого роста энергопотребления в течение XIX в. Рост установленной мощности паровых двигателей выразился громадным числом: в 20 000 раз (с 6 000 л. с. в 1 800 г. до 120 000 000 л. с. в 1900 г.). Такой рост был бы немыслим без увеличения единичной мощности машин, возросшей в среднем в 1 000 раз. Увеличение единичной мощности двигателей сопровождалось ростом экономичности, поскольку крупные единицы, как правило, экономичнее маломощных. Всемерное увеличение к. п. д. приобрело исключительное значение, так как даже при повысившейся втрое экономичности теплосиловых установок мировое потребление топлива к концу XIX в. оценивалось уже суммой в 7 млрд. руб. золотом. Особое значение имело повышение к. п. д. двигателей для транспортных установок. «Это условие (т. е. расход топлива — Авт.), — писал М. Хотинский, автор книги «История машины, пароходов и паровозов», изданной в 1853 г., — необычайно важно в отношении вопроса о пароходстве, одним из главных стеснений которого было огромное количество угля, которым должно запастись для продолжительных плаваний через океан. Известно, что пароходы, плавающие через Атлантический

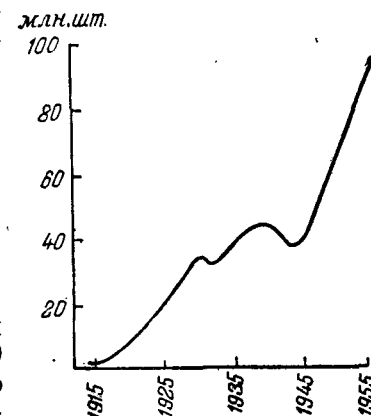


Рис. 3-9. Рост числа автомобилей в мире.

¹ Экономический к. п. д. показывает отношение полезной работы на валу теплового двигателя к теплу, внесенному в топку котлов, выраженных в соответствующих единицах.

11 История энергетической техники.

океан в Америку, потребляют в каждый рейс около 25 000 пудов угля...». Требования транспортных установок являлись весьма существенными вследствие их преобладавшей доли в потреблении энергии, что хорошо видно из рис. 1-6. Следует заметить, что в настоящее время в связи с громадным ростом автомобильного транспорта (рис. 3-9) и авиации, доля транспорта в энергобалансе остается высокой, составляя около 40 % всей потребляемой механической энергии.

Обе главные тенденции развития теплосиловых установок — увеличение единичной мощности и повышение к. п. д. — проявлялись по-разному в двух основных агрегатах теплосиловых установок XIX в.: паровых котлах и паровых машинах. Поэтому целесообразно рассмотреть более подробно процесс развития этих агрегатов.

Развитие паровых котлов

В начальный период развития паровых котлов применялся пар атмосферного давления, а поэтому забота о прочности незначительно отражалась на процессе развития котельных конструкций. Котлы Ползунова, Ньюкомена и ряда других изобретателей исходили из конструкции пивоварочных котлов, откуда и возник термин «котел», со-

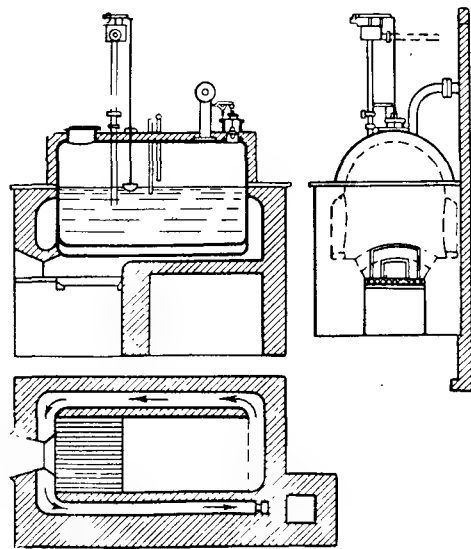


Рис. 3-10. Паровой котел «вагонного» типа (стрелками показан путь топочных газов).

хранившийся до наших дней. Рост мощности пароатмосферных двигателей вызвал к жизни первую понные существующую и действующую тенденцию котлостроения: *увеличение паропроизводительности* — количества пара, производимого котлом в час, которое достигалось разными путями.

Английский машиностроитель Д. Смитон устанавливал по два-три котла для питания паром одного цилиндра своих насосных установок. В частности, трехкотельная установка по проекту Смитона была в 1777 г. сооружена

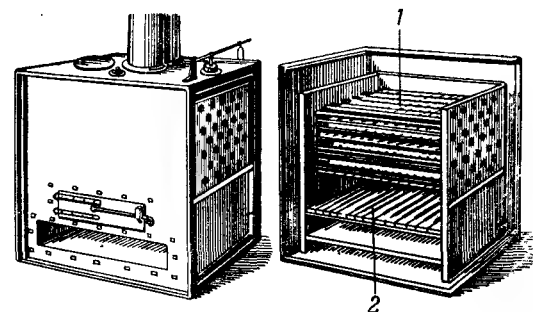


Рис. 3-11. Прототип водотрубного котла.
1—трубы; 2—колосники.

для откачивания воды из Кронштадтских морских доков. Другие конструкторы стали увеличивать активную поверхность нагрева котлов, организуя обмуровку таким образом, чтобы газы омывали не только дно, но и боковые стенки котла. Уатт сконструировал «вагонный» котел, получивший свое название по некоторому сходству со старинными вагонами (рис. 3-10) и имевший дымоходы, создававшие довольно развитую поверхность нагрева. Применение в установках Уатта давления, не превосходившего 0.25 атм, позволило получать достаточную прочность за счет слегка вогнутых днища и боковых стенок котла. Низкое давление также давало возможность при потребности в значительных количествах пара использовать опыт сооружения водогрейной аппаратуры, как это сделал американский изобретатель П. Барлоу в 1799 г. (рис. 3-11).

Однако если рост единичной мощности паросиловых установок требовал повышения паропроизводительности котлоагрегатов, то увеличение к. п. д. неизбежно приводило к конструированию более прочных котлов, так как ро-

ста к. п. д. нельзя достигнуть без повышения давления пара. Так возникла вторая поныне существующая и действующая тенденция котлостроения: *увеличение давления*.

Эффективность увеличения давления становилась все более очевидной уже в 30-е годы XIX в. Изобретатель парового молота английский инженер Нэсмит писал, что в паросиловых установках «...стали применять высокое давление, ...которое заставило бы инженеров старой школы упасть в обморок от страха. Но так как экономический ре-

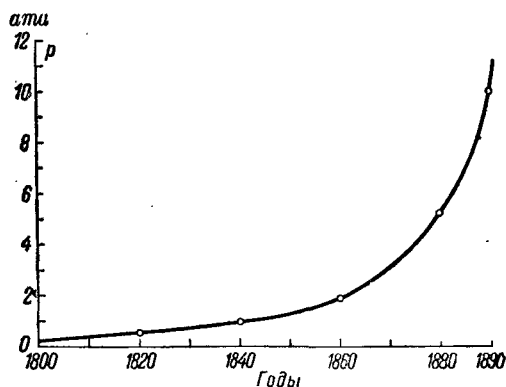


Рис. 3-12. Рост среднего давления пара паросиловых установок с 1800 по 1890 г.

зультат этого повышенного давления пара очень быстро обнаружился в совершенно недвусмысленной форме фунтов, шиллингов и пенсов, паровые котлы высокого давления при конденсационных машинах получили почти всеобщее распространение». Правда, в то время переход к «высоким давлениям» означал только повышение котельного давления с 0,05—0,1 до 0,5—1,0 атм, но наметившаяся тенденция развивалась ускоренно и к концу XIX в. котельные давления достигали значений порядка 13—15 атм (рис. 3-12).

Требование к повышению давления вошло в противоречие с требованием роста паропроизводительности котлоагрегатов. Шар — наилучшая геометрическая форма сосуда, подвергающегося большому внутреннему давлению, — дает минимальную поверхность при данном объеме, а для увеличения паропроизводительности необходима по возможности развитая поверхность. Наиболее приемлемой мерой для преодоления этого противоречия явилось исполь-

зование цилиндра — следующей за шаром геометрической формой в отношении прочности. Цилиндр позволяет сколь угодно увеличивать его поверхность за счет увеличения длины. Возник цилиндрический котел, примененный первыми наиболее решительными и смелыми приверженцами высокого давления. В 1801 г. О. Эванс в США построил паросиловую установку с чрезвычайно высоким для того времени давлением порядка 8—10 атм (рис. 3-13). Котел Эванса имел цилиндрическую форму с цилиндрической же

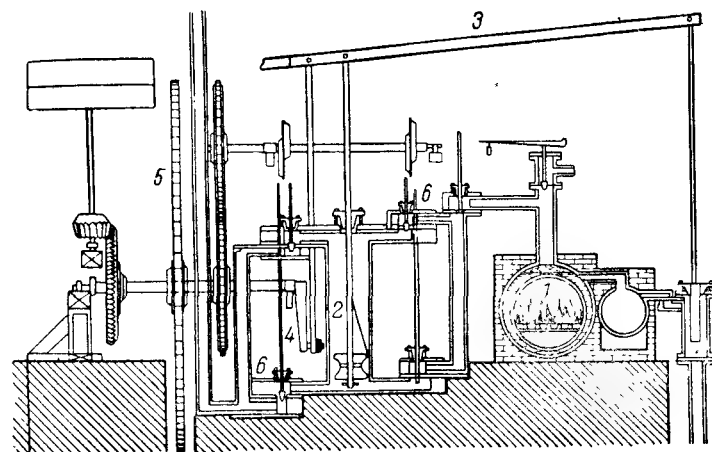


Рис. 3-13. Паросиловая установка Эванса (1801 г.).
1 — котел; 2 — цилиндр с поршнем; 3 — балансир; 4 — кривошипно-шатунный механизм; 5 — маховик; 6 — клапаны.

внутренней толпой. В 1824 г. С. В. Литвинов в Барнауле разработал оригинальную паросиловую установку высокого давления (рис. 3-14) с прямоточным котлоагрегатом, состоявшим из оребренных труб. В этой установке насос высокого давления (до 50 ат) должен был подавать питательную воду в нижнюю часть котла 3, названную изобретателем «водокалителем», в которой вода перегревалась без испарения при высоком давлении, а затем через дроссель поступала в «парообразователь» 4, где она при более низком давлении мгновенно испарялась и частично перегревалась. Отработав в цилиндре высокого давления (ЦВД) 1, пар направлялся во второй котел 6, нагреваемый отходящими газами, из которого он поступал в цилиндр низкого давления (ЦНД) 2 с меньшей влажностью. Из ЦНД пар выходил в конденсатор, а насос низкого дав-

ления 8 подавал конденсат во вторичный котел 6. Как видно, в предложении Литвинова имеются некоторые элементы и принципы современных паросиловых установок: ступенчатое испарение, прямоточные котлоагрегаты, регенерация тепла. Установка Литвинова не была осуществлена, так как рецензент признал ее непригодной, исходя из того, что таких конструкций нет в Англии.

С ростом котельного давления и паропроизводительности необходимо было уменьшать диаметр цилиндра (проч-

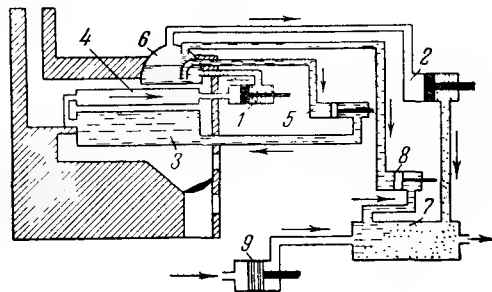


Рис. 3-14. Схема паросиловой установки С. В. Литвинова.

1 — цилиндр высокого давления; 2 — цилиндр низкого давления; 3 — водокапельник; 4 — испаритель; 5 — питательный насос высокого давления; 6 — котел низкого давления; 7 — конденсатор; 8 — конденсатный насос; 9 — циркуляционный насос.

ность) и увеличивать его длину (производительность): котел превращался в трубу. Эти тенденции проявлялись в форме дробления котлоагрегатов по двум возможным направлениям: дробились или газовый тракт котла, или водяное пространство. Таким образом, определились два основных типа котлов — жаротрубные и водотрубные.

На рис. 3-15 схематически показан исторический процесс развития котлоагрегатов двух основных типов в первой половине XIX в. Исходным типом являлся простой цилиндрический котел 1. Затем газовые каналы, образуемые кладкой котла, дополняются внутренним каналом — жаровой трубой 2 (кornваллийский котел, названный так по месту первого применения), позднее — две жаровые трубы 3 (ланкаширский котел), а затем — большое количество так называемых дымогарных труб малого диаметра, либо продолжавших движение газов за топочной камерой к задней стенке котла (4 — «пролетный» или локо-

мобильный котел), либо поворачивавших поток газов на 180° с выходом в передней стенке котла (5 — шотландский котел, получивший широкое применение в XIX в. в качестве судового котла). Наконец, паровозный котел 6 завершил развитие жаротрубных котлов.

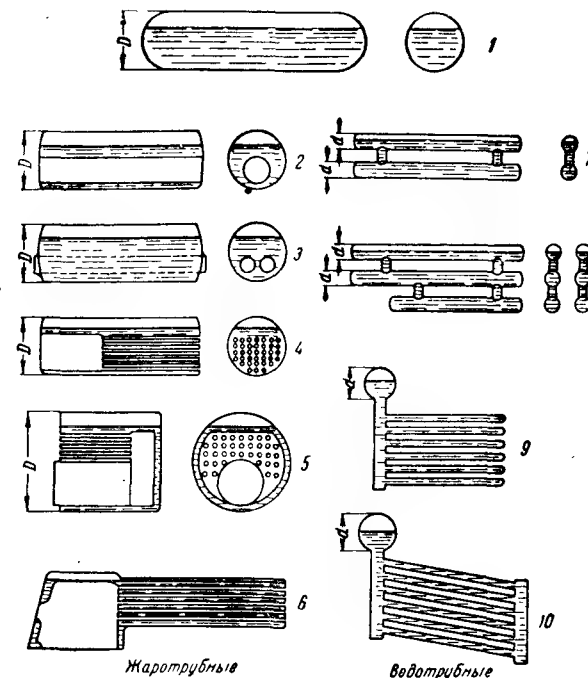


Рис. 3-15. Исторический процесс дробления водяного пространства и газового тракта котлов.

1 — цилиндрический котел; 2 — kornваллийский котел; 3 — ланкаширский котел; 4 — пролетный котел; 5 — шотландский котел; 6 — локомотивный котел; 7 — котел «двойка»; 8 — котел «шестерка»; 9 — котел Альбана; 10 — двухкамерный котел.

Дробление водяного пространства котлов в виде «двоек» 7, «шестерок» 8, «девяток» осуществлялось довольно широко в фабрично-заводских установках, причем в зависимости от расположения нижних труб такие котлы подразделялись на котлы «с кипятивильником» и котлы «с подогревателем». На рис. 3-15, 8 представлен котел «шестерка» с подогревателем, у которого укороченные нижние трубы подогреваются топочными газами после верхних и служат для подогрева питательной воды.

Рост давления привел к необходимости уменьшения диаметра трубок до величины порядка 100 мм. Тонкие трубы представляли широкие возможности компоновки самых разнообразных комбинаций поверхностей нагрева, но при

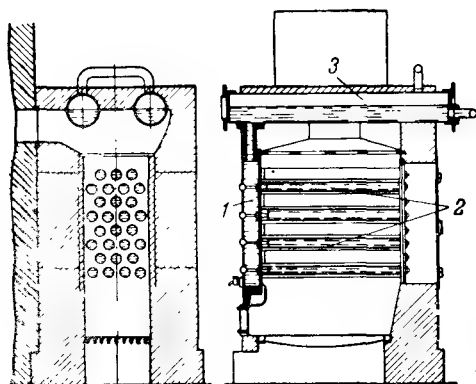


Рис. 3-16. Однокамерный водотрубный котел.
1—камера; 2—трубки; 3—паросборник.

условии обеспечения надежной циркуляции воды по трубам котла. Первые опыты, не учитывавшие роли циркуляции, были неудачными. Сконструированный немецким инженером Э. Альбаном, работавшим в Англии, однокамерный котел высокого давления (до 40 атм) (рис. 3-16 и 3-15,9) показал, что в глухих трубках котла образуются и застаиваются пузыри пара, вызывая перегрев стенок.

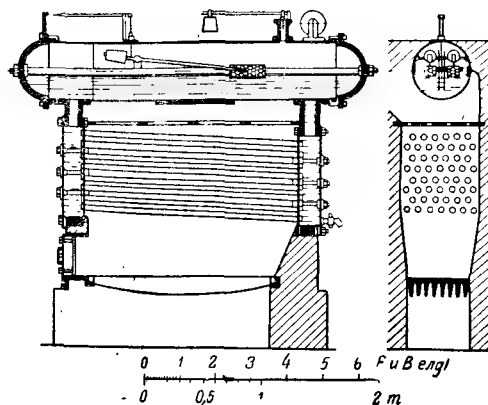


Рис. 3-17. Двухкамерный водотрубный котел.

Позднее Альбан соорудил двухкамерный котел (рис. 3-17 и 3-15,10), расположив трубы с некоторым наклоном для лучшей циркуляции пароводяной смеси. Во второй половине XIX в. двухкамерный котел получил большое распространение в ряде модификаций, предлагавшихся разными фирмами.

Водотрубным котлам предстояло пройти большой путь развития как во второй половине XIX в., так и в XX в. до наших дней включительно, на чем мы остановимся в последующих главах. Что касается жаротрубных котлов, то паровозный и шотландский котлы явились «потолком» их конструктивного развития, так как наружный барабан котлов этого типа имеет большой диаметр, не допускающий повышения давления свыше 20—30 ат.

Повысить единичную мощность паросиловых установок можно не только путем применения более высокого давления, но также увеличением их размеров и числа оборотов, что легко видеть из основного выражения мощности:

$$N_i = \frac{p_i O S n}{60 \cdot 75} \text{ л. с.},$$

где p_i — среднее индикаторное давление пара за ход поршня, кг/см^2 ;

O — площадь поршня, см^2 ;

S — ход поршня, м ;

n — число оборотов вала в минуту.

Ранние балансирные паровые машины давали по 15—20 ходов в минуту. Описанное выше увеличение числа оборотов путем введения промежуточных валов имело целью повысить равномерность вращения вала. Рост мощности требовал увеличения числа ходов поршня. К последней четверти XIX в. число оборотов вала паровых машин поднялось от десятков до сотен в минуту, особенно в связи с требованиями транспортных — судовых и паровозных машин. В паровозных машинах средняя скорость поршня достигла величины 5—7 м/сек, во много раз превзойдя начальные значения (порядка 0,5 м/сек). Увеличение числа оборотов давало, кроме увеличения мощности двигателя и снижения металлоемкости конструкции, также некоторое повышение к. п. д. Это происходило вследствие резкого снижения потерь пара от конденсации на стенках цилиндра, которые у тихоходных машин составляли до 50% подаваемого к машине пара.

Большое значение для повышения к. п. д. паросиловых установок имело введение многократного расширения пара последовательно в двух, трех и—реже—четырех цилиндрах.

После 1800 г., когда окончился длительный срок привилегий фирмы «Уатт и Болтон», доставивших компаньонам громадные капиталы, разные изобретатели паровых двигателей получили, наконец, свободу действий. Благодаря этому были реализованы запатентованные, по не применявшиеся Уаттом прогрессивные методы: высокое давление и двойное расширение. В 1804 г. А. Вульф предложил паровой двигатель, совмещавший положительные характеристики двигателей Дж. Уатта и Дж. Горнблауэра. От первого был заимствован отдельный конденсатор, от второго—двойное расширение пара последовательно в двух цилиндрах (ЦВД и ЦНД).

Потребность в увеличении числа оборотов исходила не только от «внутренних» побуждений к увеличению к. п. д.; налицо имелся и «внешний» стимул: рост числа оборотов технологических машин, двигателей транспортных установок. От балансира стали решительно отказываться. При-

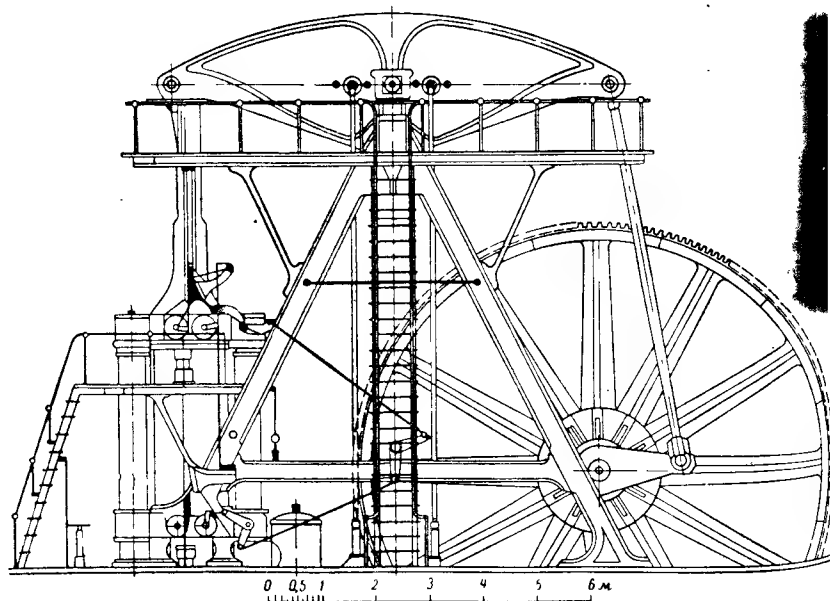


Рис. 3-18. Балансирная машина Корлисса 2500 л. с. на Филадельфийской выставке в 1876 г.

меняющийся в нескольких конструкциях паровозов, он сразу же оказался неудобным и немедленно исчез. Позднее от балансира отказались и в судовых машинах. Дольше всего он продержался в стационарных установках. «Потолок» балансира был продемонстрирован в Филадельфии (США) во время выставки 1876 г. (рис. 3-18). Балансирная машина громадной по тому времени мощности в 2500 л. с. была сконструирована известным американским конструктором Корлиссом. Корлисс достиг максимального значения

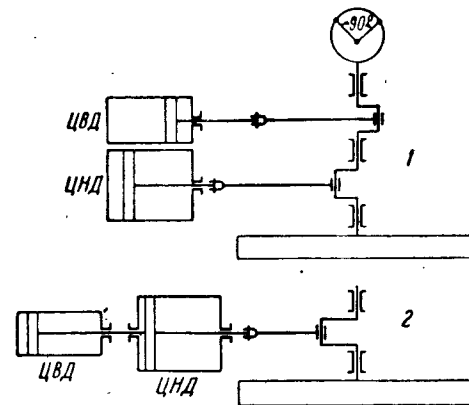


Рис. 3-19. Схема расположения цилиндров и вала машин компаунд 1 и тандем 2.

к. п. д., возможного при современных ему условиях, но не увидел «завтрашнего дня» техники. Его машины, рассчитанные на насыщенный пар и небольшое число оборотов, не были в состоянии следовать за основной тенденцией развития паротехники: парораспределительные краны Корлисса не могли работать при перегретом паре, а балансир—при повышенном числе оборотов.

Отказ от балансира и многократное расширение пара в нескольких цилиндрах обусловили возникновение новых конструктивных форм в паровых двигателях. Двигатели двукратного расширения стали оформляться или в виде компаунд-машин с углом заклинивания между кривошипами 90° (рис. 3-19,1), или в виде тандем-машин, в которых оба поршня насажены на общий шток и работают на один кривошип (рис. 3-19,2). Кривошипы машин тройного расширения стали заклинивать под углом 120° . Разбивка мощности на ряд цилиндров повлекла за собой повышение

к. п. д. за счет использования высокого перепада давлений и уменьшения теплообмена между паром и стенками цилиндров. Эта мера была полезна также для улучшения динамики двигателя, уравнивания движущихся масс и способствовала дальнейшему увеличению числа оборотов валов двигателей.

Большое значение для повышения к. п. д. паровых двигателей имело применение с середины XIX в. перегрева пара, на эффект которого еще в 30-х годах указывал французский ученый Г. А. Гирн.

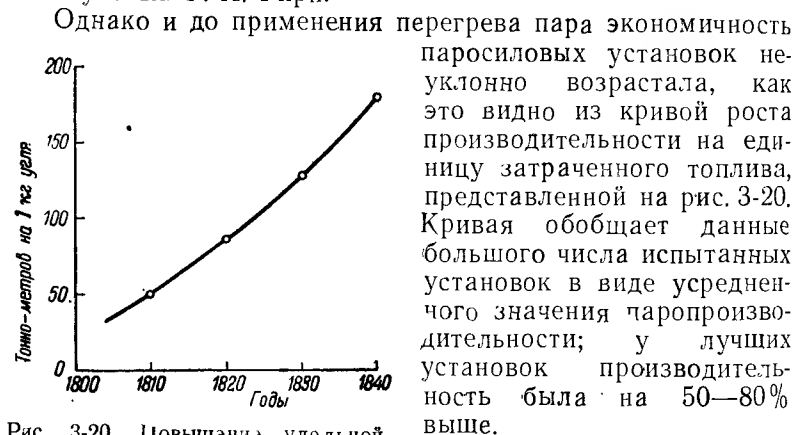


Рис. 3-20. Повышение удельной производительности паросиловых установок в первой половине XIX в.

Однако и до применения перегрева пара экономичность паросиловых установок неуклонно возрастала, как это видно из кривой роста производительности на единицу затраченного топлива, представленной на рис. 3-20. Кривая обобщает данные большого числа испытанных установок в виде усредненного значения паропроизводительности; у лучших установок производительность была на 50—80% выше.

За вторую половину XIX в. сложились в основном все конструктивные формы паровых поршневых двигателей, за исключением прямооточного, предложенного немецким профессором Штумпфом в 1908 г. Были разработаны конструкции смесительных и поверхностных конденсаторов. Первые, как не требующие дополнительного места, получили преимущественное распространение в установках на речных судах (с неограниченным запасом пресной воды). Были сконструированы три принципиально различные системы парораспределительных органов: золотники, краны, клапаны, оказавшиеся более или менее целесообразными для применения в конкретных двигателях в зависимости от числа оборотов, температуры пара, режима работы и т. п. Были предложены разнообразные системы парораспределительных и реверсивных механизмов и методы их расчета. Разработка конструкций кривошипно-шатунного механизма, уплотнений, смазочных и охлаждаю-

щих систем, регулирования, использующего центробежные и инерционные усилия и т. п., имела громадное значение не только для развития паровых двигателей. Она явилась подготовкой расчетного, конструктивного и технологического материала для освоения в будущем новых типов тепловых двигателей: паровых турбин и двигателей внутреннего сгорания.

Требования на универсальный двигатель с вращательным движением вала, стимулируя работу изобретателей паровых машин, способствовали использованию не только аккумуляирования и суммирования, но и роторного принципа. Время осуществления этого принципа наиболее целесообразным методом использования кинетической энергии пара еще не наступило, так как это было связано с необходимостью освоения крайне высоких чисел оборотов (тысячи и десятки тысяч в минуту). Поэтому изобретатели делали попытки осуществить роторный принцип в конструкции двигателя с использованием потенциальной энергии пара. Такие двигатели называли «коловоротными машинами».

«Крыльчатка» коловоротных двигателей (рис. 3-21) представляет собой вращающийся поршень, получающий рабочее движение вследствие разности давлений на его поверхностях. Если по одной трубе подводить пар избыточного давления, а другую трубу соединить с конденсатором, то вследствие разности давлений P_1 и P_2 крыльчатка будет двигаться, передавая крутящий момент валу двигателя. Трудность конструирования коловоротного двигателя заключается в том, что для поддержания разности давлений заслонка 4 должна быть опущена, а для беспрепятственного прохождения крыльчатки — поднята. Поэтому ни одна из бесчисленных конструкций коловоротных двигателей, предлагавшихся от Уатта (патент 1769 г.) до наших дней, не оказалась способной заменить поршневой двигатель. В наше время конструктивные формы и принцип работы коловоротных машин имеют применение во вспомогательных двигателях (серводвигателях) с ограниченным возвратно-качательным движением вала при неподвижной стенке 4 и применением в качестве рабочего тела пара или масла (в ряде систем непрямого регулирования).

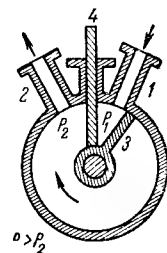


Рис. 3-21. Схема устройства коловоротной машины.

1 — вход пара; 2 — выход пара; 3 — поршень-крыльчатка; 4 — заслонка.

Расширение сферы применения парового двигателя потребовало от него все более и более широкой универсальности, способности принимать наиболее целесообразные частные формы в соответствии с конкретными нуждами промышленности и транспорта. Началась специализация тепловых силовых установок по отдельным группам, которые можно свести к следующим.

А) *Водоподъемные паросиловые установки.* В первой половине XIX в. в водоподъемниках преобладал поршневой насос. Поэтому паровые машины здесь сохраняли балансир как наиболее целесообразный вид привода к поршневым насосам. Тепловая часть установок значительно усовершенствовалась путем введения сепаратного конденсатора, двойного расширения пара, повышения давления до 4—6 атм. По данным испытаний лучшие водоподъемные установки давали удельную производительность до 195 000 кг·м на 1 кг сожженного угля, что при калорийности условного топлива 7000 ккал/кг дает к. п. д., равный

$$\frac{195\,000}{427 \cdot 7\,000} = 0,065, \text{ или } 6,5\%.$$

Некоторые отдельные паронасосные установки имеют значительный исторический интерес. К числу их следует отнести сооруженную в 1845—1852 гг. громадную установку для работы по осушению Гарлемского залива в Голландии. Вертикально расположенный цилиндр двигателя (рис. 3-22) диаметром 3 660 мм с ходом поршня 3 450 мм и весом 22 т действовал на 11 балансиров, расположенных по кругу и приводивших в действие 11 насосов. Наибольшая высота подъема, достигнутая паровыми водоподъемниками, составляла 650 м, а наибольший к. п. д. — 8%.

Б) *Шахтные подъемные паросиловые установки.* До середины XIX в. паровые машины шахтных и рудничных подъемников устраивались по общему стандарту с вертикальным цилиндром и балансиром и дополнялись в ряде случаев промежуточным валом для увеличения числа оборотов канатного барабана подъемного устройства. Специфические условия работы подъемников потребовали решения двух частных задач: тормоза и реверса. Получил применение фрикционный тормоз с канатным или ленточным захватом, заимствованный от подъемников с гидравлическим приводом. Для осуществления реверса использовался механизм переключения через промежуточный вал при не-

реверсивном двигателе. После разработки реверса в паровозных двигателях он был перенесен на шахтные и рудничные подъемные машины.

В) *Воздуходувные паросиловые установки.* В первой половине XIX в. воздуходувки приводились в движение от балансирных двигателей: паровой и воздушный цилиндры располагались по концам объединявшего их балансира.

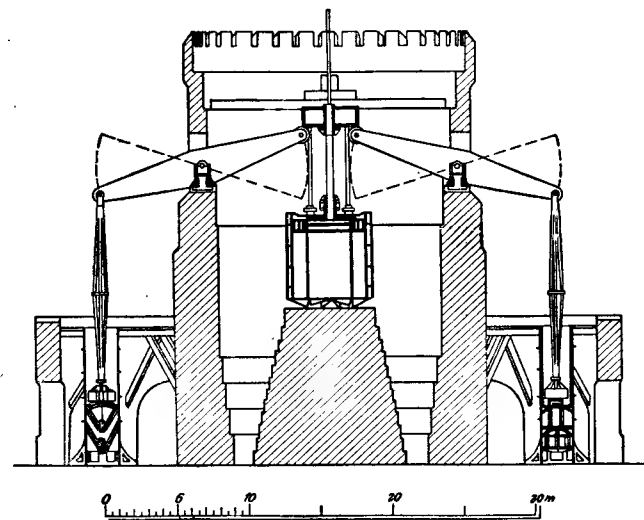


Рис. 3-22. Громадная паросиловая установка для откачивания воды (1845 г.).

Централизация воздушоснабжения привела к чрезвычайному росту мощности и размеров подобных устройств (рис. 3-23): при 20 оборотах в минуту ход поршня парового цилиндра достигал 3,96 м, воздушного цилиндра — 3,66 м (балансир неравноплечий) и при развиваемой мощности 650 л. с. подавалось 1 246 м³ воздуха в минуту. Громадная инерция движущихся масс поршней и балансира приводила к большой неравномерности движения. Введение маховика для сглаживания этой неравномерности вызывало инерционную нагрузку деталей машины. В середине XIX в. от балансира отказались, разместив поршни двигателя и воздуходувки на одном штоке по типу «тандем». На рис. 3-24 показана сдвоенная воздуходувка такого типа с маховиком в качестве замедлителя скорости поршней при подходе к мертвым положениям. Переход к центро-

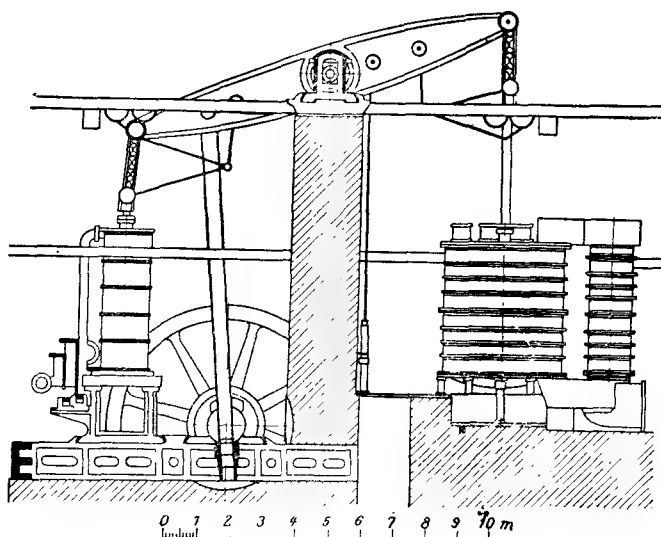


Рис. 3-23. Воздухонагнетательная паросиловая установка с балансиром (1851 г.).

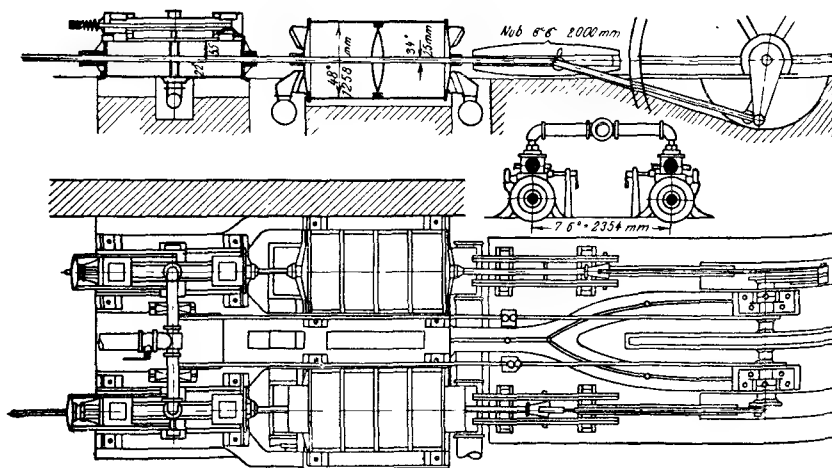


Рис. 3-24. Горизонтальная воздушная установка сдвоенного типа (конец 40-х годов XIX в., Германия).

бежным воздуходувкам с быстроходными паровыми машинами начал осуществляться в конце XIX в.

Г) *Прокатные паросиловые установки* металлургических заводов. Такие установки начали строить в конце XVIII в. в связи с введением реверсивной прокатки, однако реверс осуществлялся не в механизме самого двигателя, а во внешнем передаточном механизме, подобно тому как это имело место в ранних рудничных и шахтных подъемниках. Позднее реверсивные машины, возникшие прежде всего

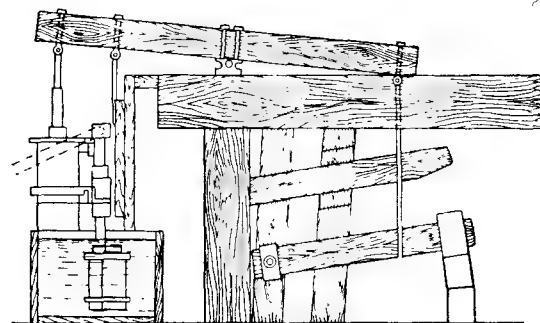


Рис. 3-25. Привод к паровому молоту от парового балансирного двигателя (по патенту Д. Уатта, 1784 г.).

на транспорте, стали применяться и в прокатных станах, особенно после 30-х годов XIX в., в связи с внедрением проката железнодорожных рельсов.

Д) *Паровые молоты*. В конструкциях паровых молотов в начальный период их развития было осуществлено механическое объединение старых хвостовых молотов (приводившихся от водяного колеса) с паровой машиной. Примером указанного объединения может служить установка, предложенная Уаттом (рис. 3-25). В условиях быстро растущего машиностроения такие установки вскоре оказались не в состоянии обрабатывать крупные детали и в первую очередь крупные валы судовых паровых машин. Новое решение было найдено Дж. Несмитом в 1840 г. в виде конструктивного объединения парового двигателя с молотом (рис. 3-26). В этом устройстве поршень, соединенный непосредственно с бойком молота, поднимался под действием

пара избыточного давления, а затем падал под действием собственного веса. Впоследствии в паровых молотах был введен «верхний пар» и к собственному весу поршня с бойком добавилось значительное усилие от давления пара на верхнюю поверхность поршня.

Е) *Локомотивы*. Потребность в передвижных паросиловых установках возникла еще в тот период, когда паро-

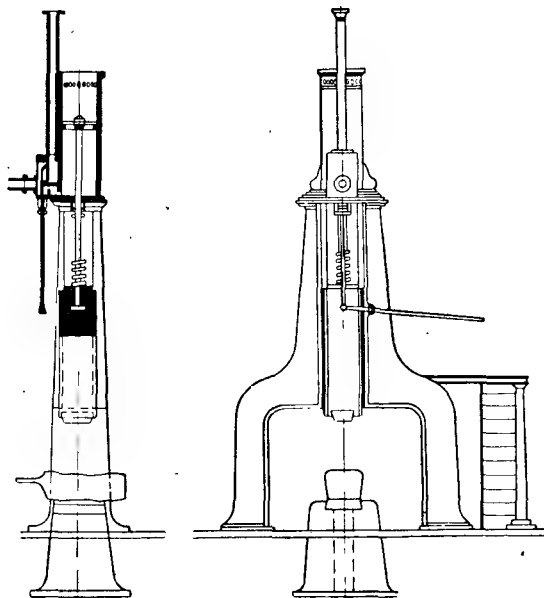


Рис. 3-26. Паровой молот по патенту Нэсмита, 1842 г.

вая машина не была универсальной и имела единственное назначение: подъем воды. Отвечая этой потребности, английский строитель паровых установок Дж. Смитон еще в 1765 г. разработал переносную установку, в которой он вместо кирпичных стен, служивших опорой для балансира, применил деревянный каркас (рис. 3-27). Машина предназначалась для откачивания воды из котлованов при разного рода строительных работах. Следует отметить, что в машине Смитона приближение оси двигателя к оси насоса превратило балансир в шкив, за которым, однако, сохранилась функция балансира — осуществлять возвратно-качательное движение.

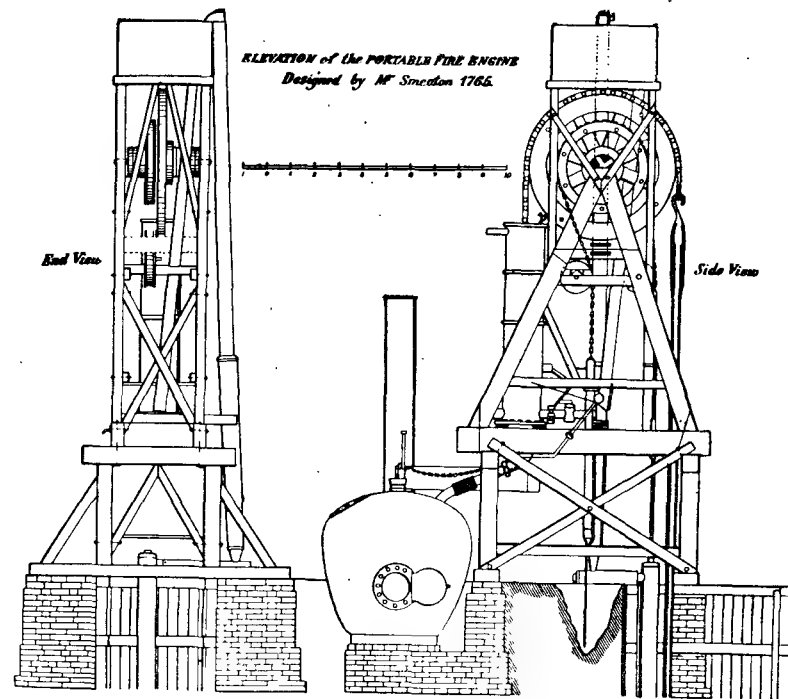


Рис. 3-27. Паронасосная транспортабельная установка Д. Смитона (1765 г.).

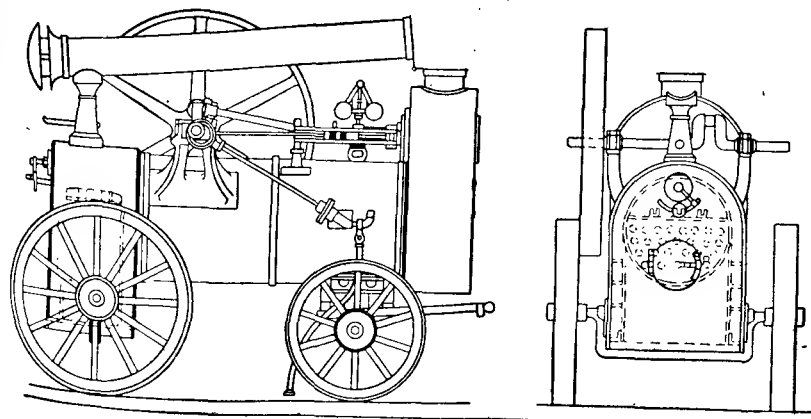


Рис. 3-28. Один из первых английских локомотивов (1848 г.).

Отдельные конструкции локомотивов с двигателями двойного действия, работавшими паром избыточного давления на выхлоп в атмосферу и установленными вместе с котлом на колесах, сооружались, начиная с 20-х годов XIX в. Однако заметное распространение локомотивов, получивших современные в своей основе конструктивные формы (рис. 3-28), началось только с середины XIX в. Они строились небольшой мощности (порядка 4—8 л. с.) с давлением пара 3—4 атм и значительной для машин того времени быстроходностью (125—150 об/мин).

**Начальный период
развития
теплоэнергетики
в России**

Первая после барнаульской установки И. И. Ползунова (1766 г.) паровая установка была сооружена в 1790 г. на Александровском заводе в Петрозаводске и предназначалась для откачивания воды на Воицком золотом прииске. Не признав талантливого строителя паровой машины Ползунова, правительство Екатерины II начало выписывать специалистов из-за границы. Шотландец Гаскойн, работавший по организации чугунолитейного и механического производства на Олонских заводах, привез с собой несколько английских механиков и мастеров, руководивших сооружением ряда паровых машин. В 1783 г. английское правительство, опасавшееся развития самостоятельного машиностроения в других странах, запретило выезд мастеров из Англии (вывоз машин частично запрещался и ранее), и только после окончания наполеоновских войн (в 1815 г.) эти запреты начали несколько смягчаться, хотя полная их отмена последовала только в 1843 г. До запрета о выезде из Англии в Россию прибыли Вильсон (заменивший на Олонских заводах Гаскойна) и Берд, основавший около С. Петербурга в 1817 г. судостроительный и машиностроительный завод с широкими привилегиями, предоставленными ему русским правительством.

В этот период в России выросли и воспитались отечественные машиностроители и механики: А. Вяткин, М. Назукин, П. Залесов, М. Лаулин, С. Литвинов, Е. и М. Черепановы и многие другие, обеспечившие развитие в России новой техники, потребность в которой непрерывно возрастала. К 30-м годам XIX в. рост в России хлопчатобумажной, льняной и шерстяной текстильной промышленности, являясь выражением первой фазы перехода к машинному производству, вызвал все обостряющуюся потребность в паровых двигателях.

В 1836 г. на Сноведском заводе (группы Выксунских заводов) была начата постройка паровых машин для текстильных фабрик Владимирской губ. Машины строились балансирующие по системе Уатта и не отличаясь высоким качеством, не выдерживали конкуренции с машинами специализированных иностранных заводов. Начался выпуск паровых машин на Александровском заводе, сыгравшем впоследствии значительную роль в развитии отечественного

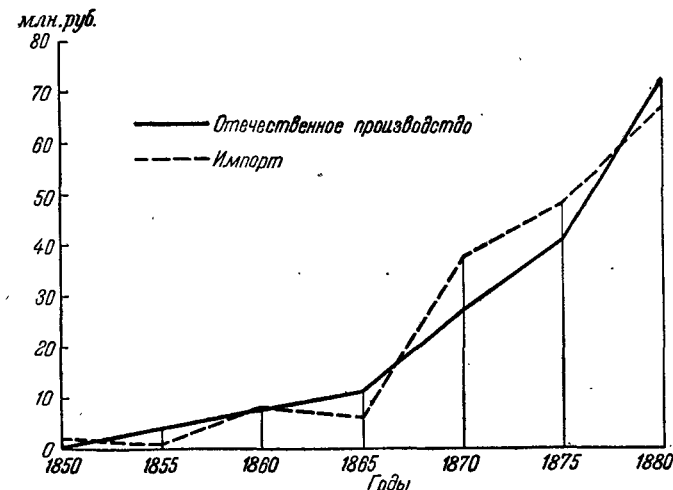


Рис. 3-29. Диаграмма роста установленной мощности паровых машин в России за счет импорта и отечественного производства в период 1850—1880 гг.

машиностроения. Судовые машины и паровозы строились на основанном в 1849 г. Сортовском заводе. Начался выпуск паровых машин на Костромском заводе Шиповых и на Тульских заводах Мальцева. Людиновский завод одним из первых в России начал постройку локомотивов.

Отечественное машиностроение далеко отставало от быстро возрастающей потребности в паросиловых установках, и в среднем 50% установленной мощности паровых машин в России обеспечивалось за счет импорта (рис. 3-29). Причины этого отставания, продолжавшегося вплоть до Великой Октябрьской социалистической революции, будут освещены в последующих главах книги.

**Универсальный
паровой двигатель
как основа
технического
переворужения
транспорта**

Универсальный паровой двигатель явился основой технической революции на транспорте, в результате которой на смену гужевому транспорту пришли железные дороги, а на смену парусным судам — пароходы. Новый транспорт, обеспечивший неизмеримо более высокую пропускную способность, явился органическим звеном новой, машинной системы промышленного производства с ее массовым выпуском широчайшего ассортимента товаров, с ее колоссальной потребностью в перевозках сырья, горючего, фабрично-заводской продукции.

Вместе с тем сам процесс возникновения сухопутного и водного парового транспорта сыграл громадную роль в совершенствовании конструктивных форм и достижении высоких экономических показателей парового двигателя. В этих вопросах определяющее значение имел ряд специфических требований к паровому двигателю, работающему в системе транспортной установки. Главными из этих требований были: небольшой удельный вес двигателя, реверсивность и возможность запуска двигателя с любого положения частей его механизма. Первое из этих требований сразу же определило транспортный паровой двигатель как двигатель избыточного давления. Поэтому совершенно не случаен тот факт, что строители первых паровых транспортных агрегатов обратились к пару избыточного давления. Среди них был французский инженер Ж. Кюньо,

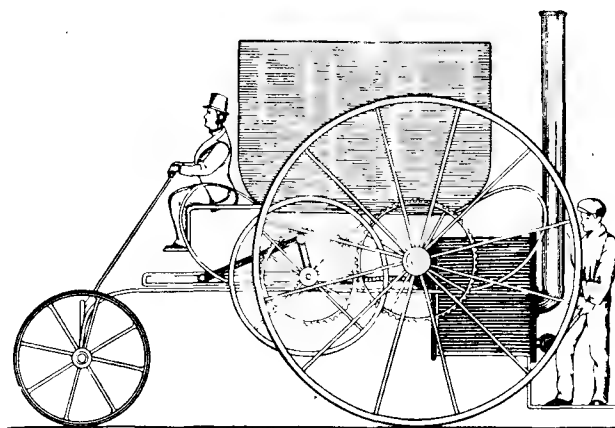


Рис. 3-30. Паровой экипаж Тревитика (1802 г.).

который в 1769 г., задолго до возникновения острой потребности в универсальном паровом двигателе, спроектировал паровую повозку для перевозки тяжелых артиллерийских орудий. Осуществляя универсальность по техническому применению методом суммирования работы двух цилиндров простого действия (как несколько ранее Ползунов), он объединил их передаточные механизмы, действовавшие поочередно на ведущее колесо повозки (см. рис. 2-44). Придя к принципиально правильной конструкции двигателя, Кюньо не нашел способа снизить удельный вес котла, который, будучи самой крупной и тяжелой частью всей повозки, не обеспечивал двигатель достаточным количеством пара.

После прекращения действия патентов Уатта, в 1802 г., англичанин Р. Тревитик запатентовал двигатель избыточного давления для применения в самодвижущихся повозках. Однако Тревитик нашел менее удачное решение, чем Кюньо. Он некритически применил к своему паровому автомобилю (рис. 3-30) одноцилиндровый двигатель двойного действия со всеми присущими ему элементами, не исключая и маховика. Эту же ошибку Тревитик повторил в конструкции своего паровоза (рис. 3-31), совместив в нем

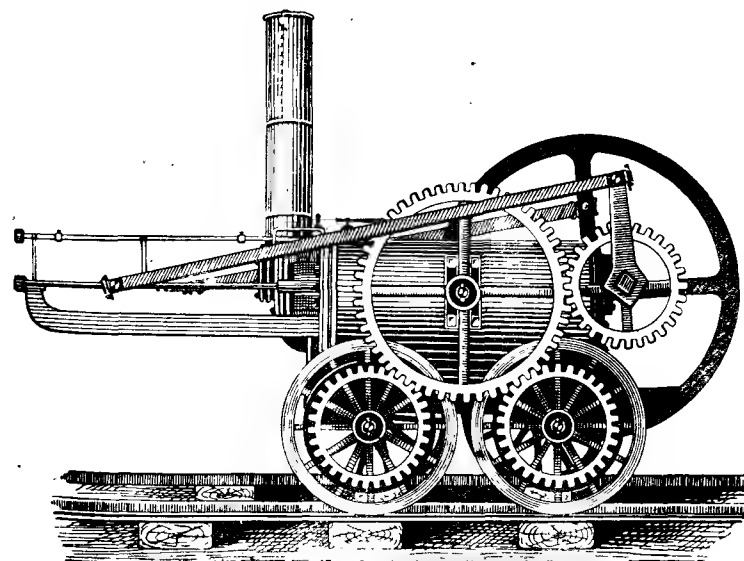


Рис. 3-31. Паровоз Тревитика с маховиком и зубчатыми передачами (1803 г.).

два аккумулятора механической работы: маховик и паровоз в целом. При изменениях скоростного режима машины динамическое равновесие системы нарушалось, вызывая поломку зубьев передаточных шестерен. Изобретая транспортный двигатель, Тревитик позаботился о скорости движения путем введения громадных ведущих колес. В последующих конструкциях ряд изобретателей, названных Марксом «кооперацией современников», вернулся к правильному решению Кюньо, но уже на более высокой ступени развития: они применяли два цилиндра двойного действия, что позволило пускать локомотив в ход при любом положении механизма. Был сделан сдвиг по сравнению с повозкой Кюньо в отношении котла: начиная с Р. Тревитика, все конструкторы паровозов первой четверти XIX в. размещали топку внутри жаровой трубы.

Однако до применения наиболее эффективного метода увеличения удельной паропроизводительности котла — устройства в нем большого числа дымогарных труб — паровоз находился в состоянии своего младенчества. Используя впервые дымогарные трубы в котле своего паровоза

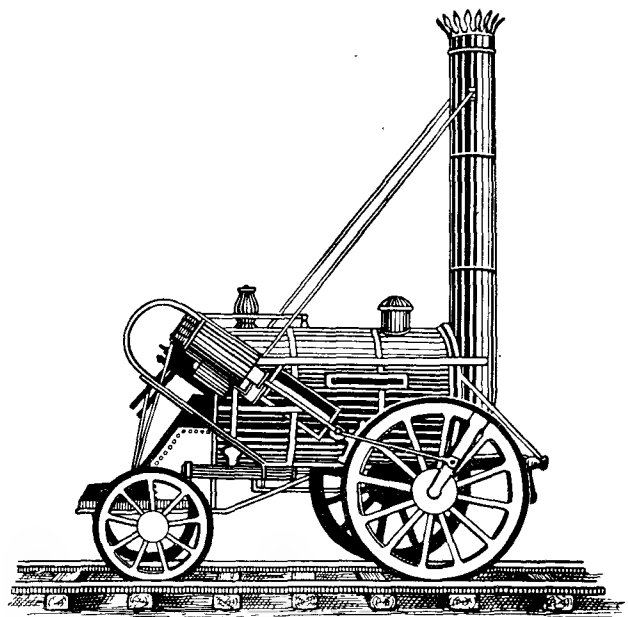


Рис. 3-32. Паровоз Дж. Стефенсона «Ракета» — победитель конкурса 1829 г.

«Ракеты», английский инженер Дж. Стефенсон вышел победителем конкурса на лучший паровоз, организованного в 1829 г. Его «Ракета» (рис. 3-32) развила скорость до 21 км/ч при весе поезда 17 т; позднее «Ракета» развивала неслыханную в то время скорость 45 км/ч, считавшуюся некоторыми медиками тех дней чуть ли не смертельной для человека. Стефенсона многие называют изобретателем первого реверсивного механизма, позволявшего на ходу переключать парораспределительный золотник машины с эксцентрика переднего хода на эксцентрик заднего хода. Этот механизм сохранил за собой название «кулиса Стефенсона». В действительности кулиса эта была изобретена работавшим на заводе Стефенсона в Ньюкастле инж. Вильямом, который построил ее в 1842 г. Название кулисы объясняется тем, что патент на нее получил Стефенсон как владелец предприятия. Необходимость в реверсивном механизме нашла отклик в трудах многих других изобретателей этих механизмов.

В России первыми конструкторами паровозов были отец и сын Е. А. и М. Е. Черепановы. В 1834 г. они построили паровоз, перевозивший 3,5 т груза со скоростью 15 км/ч. Затем ими был построен второй паровоз, который мог перевозить груз весом 17 т. Паровоз был реверсивным и имел котел с большим числом дымогарных труб (рис. 3-33).

Таким образом, конструкторы паровозов впервые ввели в паросиловые установки производительные трубчатые котлы, многоцилиндровые двигатели, пар избыточного давления, безбалансирную конструкцию механизма, устройства для реверсирования.

Прогресс судовых двигателей был более медленным, так как судовая установка предъявила к своим конструкторам менее жесткие требования, чем сухопутная. Социальный заказ промышленного переворота привлек и к этой

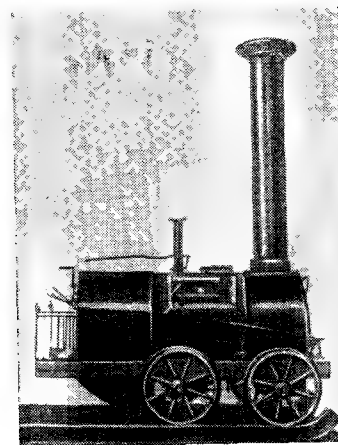


Рис. 3-33. Модель паровоза Черепановых (Музей железнодорожного транспорта, Ленинград).

области применения парового двигателя значительную группу изобретателей. Здесь также необходимо было преодоление привычных представлений. Если изобретатели первых паровозов не верили в то, что сцепление ведущих колес с гладким рельсом будет достаточным для движения поезда и применяли шестеренчатые рельсы и даже своеобразные «ноги» — толкачи (локомотив Брентона, 1813), то некоторые изобретатели первых пароходов не могли отказаться от весел как движителя. Между тем замена многих слабосильных гребцов одним мощным двигателем диктовала целесообразность устройства одного движителя — колеса или винта.

Многие попытки использования грузового аккумулятора, имевшие место пос-

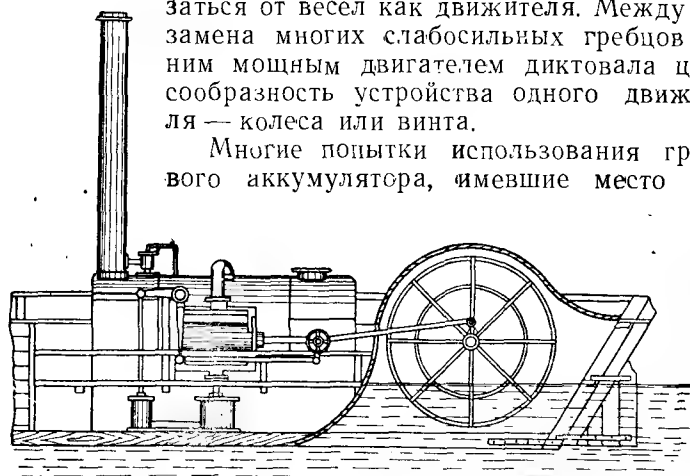


Рис. 3-34. Судовая установка Саймингтона с задним колесом (1801 г.).

ле предложения Дж. Хэлла, описанного ранее, оказались безуспешными из-за применения пароатмосферных двигателей или двигателей с прерывной отдачей работы. Становление универсального двигателя, работающего с паром избыточного давления, создало все предпосылки к использованию этого двигателя на водном транспорте. Ранние паровые суда О. Эванса, В. Саймингтона, Дж. Фитча, Стевенса и многих других не получили отклика в промышленных сферах, несмотря на то, что их конструкторы нашли ряд прогрессивных решений. На своем судне с задним колесом (рис. 3-34) Саймингтон первым отказался от балансира, и общее расположение его установки вполне соответствует более поздней практике построения заднеколесных судов включительно до 20-х годов XX в. Наихудшее техническое решение — механический перенос на судно стационарного двигателя с его балан-

сиром и маховиком (рис. 3-35) — принадлежало Фульто-ну, получившему наибольшую известность в истории в силу того, что его пароход «Клермонт» явился первым коммерческим судном.

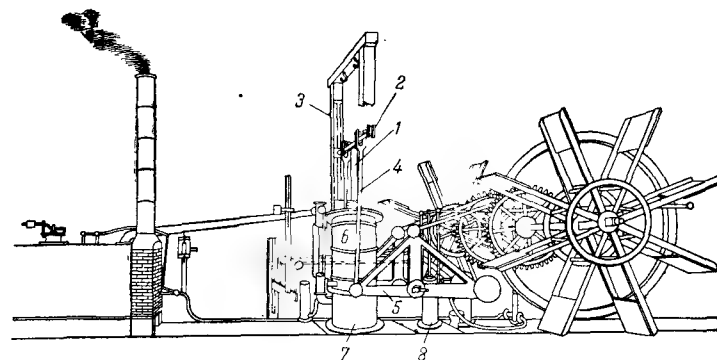


Рис. 3-35. Паровой двигатель парохода «Клермонт».

1 — шток; 2 — крейцкопф; 3 — направляющая; 4 — шатун; 5 — баланsir; 6 — поршень; 7 — цилиндр.

В России постройка пароходов была начата в 1815 г. Ф. Бердом; в 1820 г. между С. Петербургом и Кронштадтом курсировали уже четыре парохода, называвшиеся тогда «пироскафами». Позднее судовые машины строились на Ижорском заводе, машины для речных судов — на Пожевском заводе (с 1817 г.), на Мальцевских заводах, а позднее — на Сормовском. Ижорскому заводу принадлежит первенство постройки и внедрения безбалансиного судового двигателя на пароходе «Геркулес» в 1832 г.

К 30—50-м годам XIX в. разорение мелких ремесленников и кустарей в связи с ростом капиталистического фабрично-заводского машинного производства вызвало социальный заказ на новый двигатель. Субъективно этот заказ основывался на неправильном представлении о том, что, будучи снабженным дешевым маломощным двигателем, ремесленник станет конкурентоспособным в борьбе с крупным капиталистическим производством. Объективно такой заказ являлся проявлением двигательной силы, так как исходил от широких кругов населения. Развитие паровых силовых установок подсказало изобретателям конкретные формы нового дешевого и экономичного двигателя, как «машины без котла», являвшегося

Возникновение
двигателей
внутреннего сгорания

ся наиболее дорогой и громоздкой частью паросиловых установок. Отказ от котла означал сжигание горючего внутри самого двигателя, который еще до своего возникновения получил сохранившееся и поныне название «двигателя внутреннего сгорания». Таким образом, развитие паровой машины подготовило конструктивные формы нового порш-

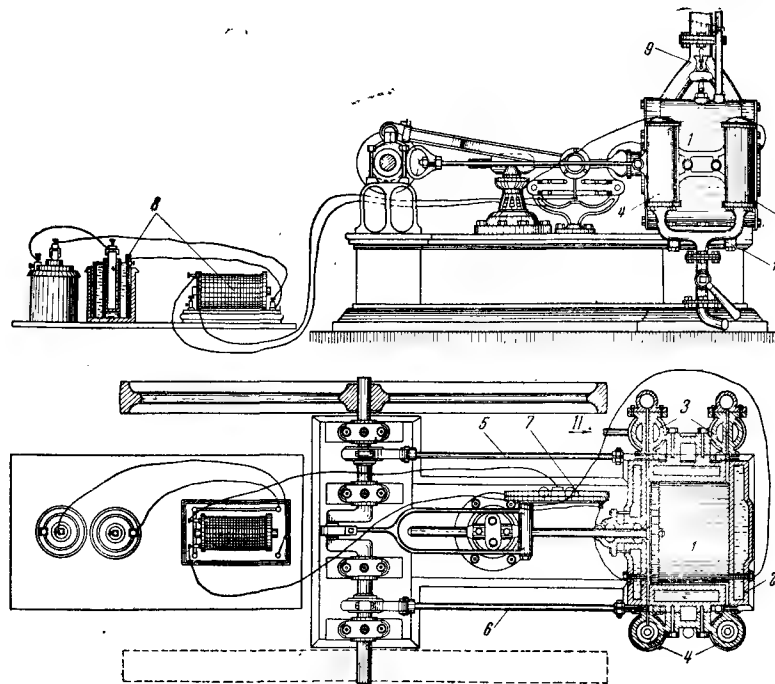


Рис. 3-36. Двигатель Ленуара.

1 — цилиндр; 2 — водяная рубашка; 3 — впускные золотники; 4 — выпускные золотники; 5 — тяга системы впуска; 6 — тяга системы выпуска; 7 — распределительный диск моментов зажигания; 8 — электрическая батарея с индукционной катушкой; 9 — подача газа; 10 — выхлоп; 11 — вход охлаждающей воды.

невого двигателя. Другими существенными условиями, ускорившими возникновение двигателя внутреннего сгорания, явились: газовое горючее, технология производства которого была разработана в начале XIX в., и индукционная катушка, позволявшая зажигать горючую смесь в полости цилиндра индуктированным током высокого напряжения.

Перечисленные возможности построения нового двигателя были реализованы в конструкции, предложенной в 1860 г. французом Ж. Ленуаром (рис. 3-36). Испытания

двигателя Ленуара показали, что экономический к. п. д. его имел значение всего 3,3%, тогда как у паровых двигателей того времени этот к. п. д. достигал 8—10%. Низкая экономичность двигателя Ленуара была следствием нерационального цикла, разработанного изобретателем (рис. 3-37). При всасывании горючей смеси светильного газа с воздухом до половины хода поршня расширение ограничивалось второй половиной хода поршня и было поэтому всего-навсего двукратным, т. е. срабатывавшим крайне небольшой перепад располагаемого теплосодержания.

Значительно уменьшить расход горючего удалось немецким изобретателям Н. Отто и Е. Лангену, которые умело использовали все возможности совершенно неперспективного газоатмосферного двигателя, предлагавшегося в 1854 г. в крайне недоработанном виде итальянцами Барзан-ти и Маттеучи. Это было возрождением принципа «пороховой машины» Д. Палена с использованием вместо пороха газовой смеси. Внешний вид двигателя представлен на рис. 3-38. Так как всасывание рабочей смеси осуществлялось только на $\frac{1}{10}$ хода поршня (рис. 3-39), расширение проходило далеко в область вакуума, позволяя срабатывать больший, чем у Ленуара, теплоперепад. 10-кратное расширение позволило получить экономический к. п. д. 14%, явившийся «потолком» для двигателей подобного типа.

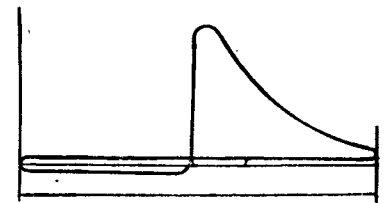


Рис. 3-37. Индикаторная диаграмма работы двигателя Ленуара.

Дальнейшее повышение к. п. д. могло быть достигнуто только за счет предварительного сжатия рабочей смеси. Это прежде всех понял французский инженер Бо-Де-Роша, опубликовавший в 1862 г. небольшую брошюру «Новейшие исследования относительно практических условий применения теплоты», в которой он описывал цикл четырехтактного (рис. 3-40) двигателя, широко распространенного в наше время. Бо-Де-Роша не запатентовал своего предложения и не делал попыток его реализации. Четырехтактный двигатель был впервые осуществлен в 1878 г. Н. Отто и Е. Лангеном, построившими такой двигатель с к. п. д. 22%.

Практика построения четырехтактных двигателей, показав прежде всего несостоятельность надежд разорвавшихся ремесленников на возможность конкурировать с крупным капиталом, явилась основой для значительных капиталовложений в производство двигателей внутреннего сго-

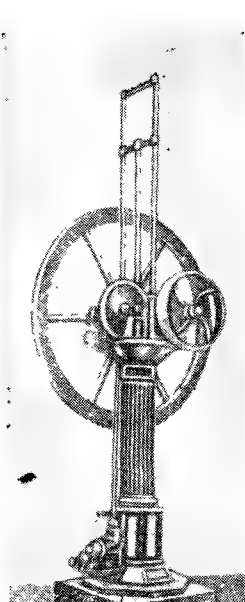


Рис. 3-38. Атмосферный двигатель Отто и Лангена (1865 — 1866 гг.).

рания. Расширение производства двигателей внутреннего сгорания вызвало их специализацию. Строились газогенераторные двигатели одновременно с улучшением конструкций газогенераторов. Конструировались двигатели для привода доменных воздуходувок с использованием газов доменных печей. Началось широкое использование высококалорийного жидкого топлива. Тяжелое жидкое топливо стали применять в калоризаторных двигателях с калоризатором («запальным шаром»), раскаливающимся докрасна и служащим для воспламенения вбрызнутого го-

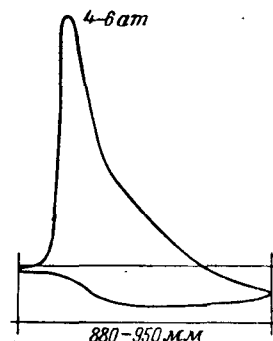


Рис. 3-39. Индикаторная диаграмма работы двигателя Отто и Лангена.

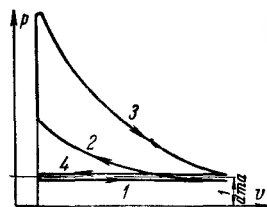


Рис. 3-40. Индикаторная диаграмма четырехтактного двигателя.

1 — всасывание; 2 — сжатие; 3 — расширение (рабочий ход); 4 — выхлоп продуктов сгорания.

рящего. Для легких сортов жидкого топлива стали строить карбюраторные двигатели с получением в карбюраторе смеси из мелко распыленного частично испарившегося топлива с воздухом. Двигатели начали специализироваться по областям их применения в качестве судовых, стационарных, газогенераторных, позднее — автомобильных, еще позднее — авиационных. Особая линия развития возникла с изобретением двигателей высокого сжатия в конце XIX в.

«Калорические» двигатели — предшественники современных газовых турбин

Результатом стремления осуществить тепловой двигатель без котла явились не одни только двигатели внутреннего сгорания. Помимо дороговизны и сложности в эксплуатации котлы первой половины XIX в. имели еще один существенный недостаток, происходивший из недостаточно глубокого и отчетливого представления о протекающих в котлах процессах. Этот недостаток — взрывоопасность. Частые взрывы котлов нередко сопровождались человеческими жертвами. М. Хотинский писал в упоминавшейся выше книге¹, что «...В Америке, где это условие (контроль за исправным действием предохранительных клапанов. — Авт.) отнюдь не соблюдается, взрывы паровиков — вещь самая обыкновенная и стоят ежегодно жизни многим сотням, если не тысячам людей».

Стремление избавиться от котла направило поиски изобретателей на использование воздуха в качестве рабочего тела теплосиловых установок, получивших название «калорических». Примером калорической установки может служить теплосиловая установка шведского инженера Д. Эриксона, относящаяся к середине XIX в., в которой два калорических двигателя работали в течение некоторого времени на одном из заводов в Нью-Йорке. Калорическими двигателями было оборудовано морское судно «Эриксон», а в несколько упрощенной конструкции подобный двигатель работал на заводе Нобеля в Петербурге.

Схема, выполненная по чертежам двигателя, опубликованная в одном английском журнале за 1852 г., дает представление об устройстве и действии калорического двигателя Эриксона (рис. 3-41). Рабочим телом являлся воздух, нагреваемый в цилиндре двигателя от расположенной под цилиндром топки. Работа расширения нагреваемого возду-

¹ История паровых машин, пароходов и паровозов, общепонятно изложенная М. Хотинским, членом разных ученых обществ, СПб, 1853.

ха расходуется по трем направлениям: 1 — передается движителю (балансир, передающий работу; на схеме опущен), 2 — аккумулируется в поднимаемом тяжелом поршне и 3 — затрачивается на сжатие воздуха в полости компрессора. Сжатый воздух через нагнетательный клапан подается в камеру и далее при открытом золотнике отверстия подается в рабочий цилиндр, пройдя предварительно теплообменник, называвшийся тогда «регенератор» (сей-

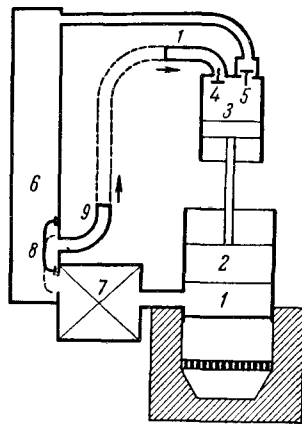


Рис. 3-41. Схема «калорической машины» Эриксона.

1 — рабочий цилиндр; 2 — поршень; 3 — компрессор; 4 — всасывающий клапан; 5 — нагнетательный клапан; 6 — промежуточный резервуар; 7 — теплообменник; 8 — перепускной золотник; 9 — выхлопная труба; 1 —

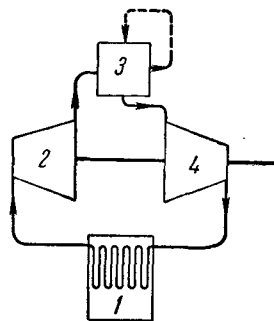


Рис. 3-42. Схема современной газотурбинной установки с замкнутым циклом.

1 — котел-нагреватель; 2 — газовая турбина; 3 — теплообменник; 4 — осевой компрессор.

час — регенератор). Регенератор заполнялся мелкой медной сеткой. Воздух, проходя через ячейки сетки, нагретые в течение предыдущего хода двигателя, нагревался перед поступлением в цилиндр. Обратный ход осуществлялся за счет энергии, аккумулированной в поднятом тяжелом поршне, который, опускаясь, отдавал работу движителю судна и выталкивал горячий воздух из цилиндра. Отработавший воздух сначала нагревал насадку регенератора, а затем под золотником, находящимся в другом положении, выходил в выхлопную трубу. Одновременно опускающийся поршень производил работу всасывания воздуха в полость компрессора через приемную трубу и всасывающий клапан. Была предусмотрена возможность осуществления замкнутого цикла с циркуляцией одного и того же количества воздуха при соединении выхлопной трубы

с приемной трубой, как показано пунктиром на рис. 3-41.

При сравнении принципиальной схемы калорического двигателя со схемой газовой турбины замкнутого цикла (рис. 3-42) обнаруживается полное тождество. Воздушный котел и газовая турбина современного двигателя соответствуют по выполняемым ими функциям цилиндру калорического двигателя с расположенной под ним топкой. Теплообменник и компрессор используются и в современной газовой турбине. Схема газотурбинной установки может быть замкнутой, как это показано пунктиром на рис. 3-42. Несмотря на тождество принципиальных схем, вытекающее из тождества принятых циклов, между калорическими двигателями и современными газовыми турбинами лежит длительный и трудный путь исторического развития. На этом пути были разработаны эффективные циклы газового двигателя, исследованы и обобщены сложные условия теплообмена, осуществлен переход от поршневых конструкций к роторным, означавший переход от десятков к тысячам оборотов в минуту, освоена технология получения жаростойких сталей, достигнут высокий к. п. д. турбокомпрессоров. В результате упорной работы многих конструкторов возникла газовая турбина, к. п. д. которой приближается к 50%. Исследования установки судна «Эриксона», опубликованные в 1852 г., показали, что к. п. д. двигателей «Эриксона» не превосходил к. п. д. средних паровых машин, а сам двигатель был крайне громоздким. Так, для получения мощности 170 л. с. на судне были установлены четыре двигателя, имевшие цилиндры диаметром 4,2 м с ходом поршня 1,8 м.

На мелких предприятиях калорические двигатели получили некоторое распространение. В частности, в России строился маломощный калорический двигатель, называвшийся «Тепло и сила». С развитием высокоэкономичных двигателей внутреннего сгорания поршневые калорические двигатели отмерли и получили свое второе рождение в современных воздушных турбинных установках.

Разработка теоретических основ теплоэнергетики и исследования свойств рабочих тел

Когда растущие расходы по эксплуатации паросиловых установок стали совершенно недвусмысленно отражаться на коммерческом балансе заводов и фабрик, началось все более и более глубокое исследование паровых двигателей. В начальный период эти исследования,

не имевшие теоретической базы для возможных обобщений, завершались установлением чисто эмпирических правил и формул, как, например: «Расход угля на 1 800 ходов машины равен произведению из объ-

ёма цилиндра в кубических футах на давление на поршень в футах на квадратный дюйм». Здесь отражена практика работы паромасфериных установок с единым для них давлением пара порядка 1 *ата* и числом ходов поршня около 15 в минуту. С повышением давления пара и числа оборотов избыточное давление и скорость поршня входят в состав эмпирической формулы для определения мощности в уже установленной единице — лошадиной силе: «Умножить разность 0,6 избыточного давления в котле и 0,4 атмосферного давления на квадрат диаметра цилиндра и на скорость поршня, затем разделить на 45 000; в результате будет мощность в л. с.» В течение длительного времени применялась рекомендованная для судовых двигателей английским адмиралтейством формула для определения так называемой «номинальной» мощности:

$$\frac{D^2 v}{6\,000} \text{ л. с.,}$$

выраженной в зависимости только от диаметра цилиндра и скорости поршня. Для локомотивов с относительно одинаковым числом оборотов формула номинальной мощности была еще проще:

$$\frac{D^2}{10} \text{ л. с.}$$

С развитием паровых двигателей и расширением диапазона применявшихся давлений и скоростей поршня, с введением машин многократного расширения и первыми опытами применения перегрева пара расхождения между расчетной номинальной мощностью и действительной (индикаторной) стали совершенно неприемлемыми. Все острее начала ощущаться потребность в знании свойств рабочего тела — водяного пара. Исследования водяного пара, выполнявшиеся ранее вне связи с потребностями практики (Д. Пален, определивший в 1691 г. зависимость температуры парообразования от давления; Циглер, в 1759 г. уточнивший данные Палена), перестали быть единичными, когда возник практический интерес к свойствам водяного пара. Этот интерес побудил Уатта совместно с Д. Блеком провести работу, в результате которой было найдено отношение объема насыщенного пара к объему воды при 1 *ата* (1800) и построены достаточно точные кривые зависимости между давлением и температурой водяного пара от 0°С и 1 *ата* до 100°С в соответствии с потребностями паротехнической практики того времени.

Пар как рабочее тело все шире распространяющихся паровых двигателей начал привлекать к себе внимание ученых. Бетанкур (1792 г.), Прони (1796 г.), Робисон (1822 г.), Трегольд (1838 г.) и другие ученые исследуют и уточняют сведения о свойствах водяного пара с определенной целью лучшего понимания процессов, происходящих в паросиловых установках.

Первая четверть XIX в. характеризуется значительным расширением познаний о свойствах рабочих тел и главным образом водяного пара. Ряд физиков — Дж. Дальтон, Л. Ж. Гей-Люссак, П. Л. Дюлонг, А. Т. Пти, Ф. Д. Араго — проводит достаточно точные измерения, далеко выходя за пределы параметров, применявшихся в практике (от 1/561 до 24 *ата*). Исследования свойств пара были дополнены исследованиями газов, причем ряд ученых пришел к широким научным обобщениям: Гей-Люссак определил коэффициент расширения газов, Дальтон открыл закон газовых смесей. Авагадро в 1811 г. разработал гипотезу о равном числе молекул в равных объемах газа при равных условиях.

Гипотеза Авагадро, снова выдвинутая в работах Жерара в 1842 г., закладывала основы атомной химии и подготавливала данные для последующего утверждения молекулярно-кинетической теории тепла.

В 40-х годах XIX в. паровые машины начали играть настолько существенную роль в производстве, что французское правительство предприняло обширные опыты по определению ряда величин, используемых при тепловых расчетах, поручив проведение этих опытов физiku А. В. Реньо.

Работы Реньо составили три больших тома, в которых были изложены результаты исследований по термометрии, по отклонению свойств реальных газов от законов Бойля — Мариотта и Гей-Люссака, по теплоемкости газов. Но основное содержание работ относилось к исследованию свойств водяного пара, для которого были найдены плотность жидкости при разных температурах, давление и плотность насыщенного пара, теплота жидкости и теплота парообразования, а также (в небольшом интервале) свойства перегретого пара.

Исследования Реньо были дополнены опытами Г. А. Гирна, исследовавшего ряд свойств насыщенного водяного пара. Гирн впервые ввел понятие о паросодержании или степени сухости водяного пара. Теплота парообразования рассматривалась им состоящей из двух частей: внутренней, связанной с работой разъединения молекул в процессе образования пара, и внешней, идущей на совершение работы расширения в процессе парообразования. Исходя из подобного рассмотрения полного процесса парообразования, Р. Клаузиус вывел уравнение, связывающее изменение удельного объема при парообразовании с величиной скрытой теплоты. Это уравнение, намечавшееся в работах Б. Клапейрона, получило название уравнения Клапейрона — Клаузиуса.

Основываясь на результатах исследований Реньо и Гирна, немецкий ученый Г. А. Цейнер разработал полную и систематическую теорию насыщенного водяного пара с выводом всех необходимых формул и соотношений, а позднее — и теорию перегретого пара. Им же были составлены обширные таблицы свойств водяного пара, которые являлись общепринятыми до начала XX в. Во втором издании своих «Основ механической теории тепла» Цейнер, исследуя работу тяговых конусов паровозов и парового инжектора, разработал уравнение истечения пара.

Параллельно с изучением термодинамических свойств рабочих тел, преимущественно водяного пара, все шире проводились исследования по определению величины механической работы, получаемой в цилиндрах паровых двигателей. Развивавшееся ранее в этой области эмпирическое направление с повышением параметров пара оказывалось все более и более несостоятельным. Первые труды по разработке теории паровых двигателей принадлежат немецкому ученому Р. Клаузиусу и английскому ученому В. Ренкину, которые разработали теоретический «идеальный» цикл парового двигателя, используемый и в настоящее время как удобный эталон совершенства паровых двигателей. Несколько позднее, в своей теории паровой машины, Цейнер развил труды Ренкина, глубоко исследовав характер потерь, вызываемых неполным расширением пара и наличием вредного пространства.

Сложность процессов, происходящих в полостях цилиндров реальных паровых двигателей, приводила к значительному разрыву между данными теории и результатами опытов. В связи с этим начало развиваться экспериментальное направление в исследовании принципов работы паровых двигателей. Начало этому направлению положил Г. А. Гирн во Франции, Ю. Кларк в Англии, Ишервуд в США. Их работы прежде

всего показали, что нельзя игнорировать, как это делали авторы теоретических работ, наличие теплообмена между паром и стенками цилиндра. Поэтому изучение процесса теплообмена и его зависимости от ряда факторов стали основой экспериментальных исследований, позволивших сблизить теорию с практикой и установивших влияние на эффективность работы паровых двигателей ряда существенных факторов: перегрева пара, паровой рубашки, многократного расширения пара, величины вредного пространства, числа оборотов вала и скорости поршня, объема ресивера, качества изоляции, отношения рабочих объемов цилиндров, типа парораспределительных механизмов, величин предварений впуска и выпуска пара, величин наполнения и степени сжатия и многих других практических факторов. Оценка этих факторов на основе данных многочисленных опытов дала возможность производить расчеты паровых двигателей с достаточной для практик степенью точности и благодаря этому значительно увеличить к.п.д., приблизить реальный цикл к теоретическому, эффективность индикаторной работы к эффективности работы «идеального» цикла.

Развитие практической теплоэнергетики нашло свое отражение и в работах ряда отечественных ученых. В 60—80-х годах XIX в. в России сложилась школа теплотехников, а в технических учебных заведениях стал читаться курс механической теории тепла. Вышел ряд книг по теории тепловых двигателей: А. В. Гадолина, И. А. Вышнеградского, Ф. Ф. Петрушевского. Несколько глубоких исследований опубликовал в виде статей преподаватель Морского корпуса И. П. Алымов, который одним из первых в отечественной научной литературе дал обстоятельный анализ экономичности работы паровых двигателей на основе механической теории тепла. Профессор Петербургского университета М. Ф. Окатов разработал вывод аналитического выражения второго закона термодинамики. Важные исследования второго закона термодинамики были проведены профессором Киевского университета Н. Н. Шиллером, предложившим оригинальную математическую трактовку этого закона. В связи с возникновением «калорических» двигателей общий анализ регенеративного цикла как метода приближения к теоретическому циклу Карно осуществил И. А. Вышнеградский. Впервые метод определения экономии при комбинированном получении механической работы и тепла (теоретические основы эффективности теплофикации) был разработан И. А. Тиме.

В исследованиях свойств рабочих тел большое значение имели труды великого ученого Д. И. Менделеева, который вывел общее уравнение состояния для идеального газа. В 1861 г. Менделеев открыл явление критического состояния вещества и определил температуру этого состояния, назвав ее «абсолютной температурой кипения». Первое экспериментальное определение критической температуры воды было выполнено в лаборатории Киевского университета.

Теплотехническая практика, все шире вторгавшаяся в промышленность и транспорт, способствовала возникновению обобщающих теоретических работ. К таким обобщающим работам следует прежде всего отнести труды Ж. Б. Фурье и С. Карно.

В работе «Аналитическая теория тепла», вышедшей в 1822 г., Фурье установил общие законы теплопроводности, применив специальные математические методы (ряды и интеграл Фурье), которые получили широкое применение для решения задач математической физики. Работа Фурье может служить примером того, как решение задач, поставленных техникой, способствует дальнейшему развитию науки. Однако теория теплорода, лежавшая в основе воззрений Фурье, приве-

ла к тому, что он не смог в своем труде сделать обобщения, которые соответствовали бы его названию: вместо «аналитической теории тепла» Фурье блестяще разработал аналитическую теорию теплопроводности.

Непосредственно от задач практики исходила теоретическая работа С. Карно «Размышление о движущей силе огня», изданная в 1824 г. Ее автор, поставив чисто практическую задачу исследовать причины высокого расхода топлива в паровых машинах, пришел к исключительно глубоким выводам. Он писал: «Возникновение движущей силы объяснено в паровых машинах не действительной трате теплорода, а его переходу от горячего тела к холодному, т. е. восстановлению его равновесия — равновесия, которое было нарушено некоторой причиной, будь то химическое действие, как горение, или что-нибудь иное». «Согласно этому принципу, — писал далее Карно, — недостаточно создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добавить холод; без него теплота стала бы бесполезна», — и далее: «Повсюду, где имеется разность температур, может происходить возникновение движущей силы».

Приведенные положения, дополненные выводом о принципиально-циклической работе тепловых двигателей, показывают, что Карно впервые сформулировал положения второго закона термодинамики. Термин «теплород», имеющийся в приведенных словах Карно, не означает, что он был сторонником теории теплорода. Уже в цитируемой работе Карно писал о том, «...что основные положения, на которые опирается теория тепла, требуют внимательного исследования. Некоторые данные опыта представляются необъяснимыми при современном состоянии теории». Стремясь объяснить эти данные опыта, Карно пришел к механической теории тепла, к утверждению первого закона термодинамики об эквивалентности между теплотой и механической работой. Изданные в 1878 г. рукописи Карно, умершего в 1832 г., показывают, что он после выхода в свет своего первого труда «Размышление о движущей силе огня» пришел к научно обоснованному выводу о механической теории тепла и теоретически определил величину механического эквивалента тепла в $370,4 \text{ кГ} \cdot \text{м/ккал}$.

Карно разработал понятие о круговом процессе, о принципиальной периодичности работы тепловых двигателей. Он нашел такой круговой замкнутый процесс («цикл Карно»), при котором между двумя температурными уровнями T_1 и T_2 можно получить максимум работы (рис. 3-43). Для этого надлежит подводить к рабочему телу тепло Q_1 от верхнего уровня T_1 при постоянной температуре этого уровня (процесс 1—2), затем производить расширение рабочего тела без подвода и отвода тепла до тех пор, пока его температура не понизится до значения нижнего уровня T_2 (процесс 2—3), затем — сжатие при постоянной

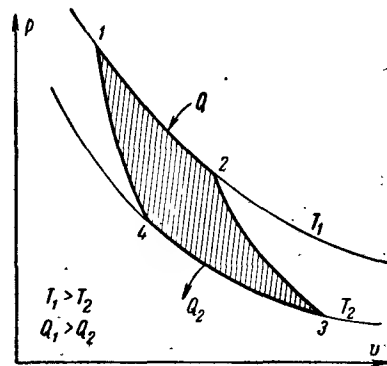


Рис. 3-43. Цикл Карно в p - v -координатах.

1—2—изотермическое расширение; 2—3—адиабатическое расширение; 3—4—изотермическое сжатие; 4—1—адиабатическое сжатие.

температуре T_2 с отводом тепла Q_2 к нижнему источнику (процесс 3—4) и, наконец, снова сжатие без подвода и отвода тепла (процесс 4—1) до тех пор, пока температура рабочего тела не достигнет начального значения T_1 . В этих условиях разность $Q_1 - Q_2$ будет максимальной, а термический к. п. д., равный согласно выводу Карно

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

или

$$1 - \frac{T_2}{T_1},$$

будет наибольшим. Таким образом, работы Карно отчетливо показали, что увеличение термического к. п. д. любого теплового двигателя прямо зависит от повышения начальной температуры T_1 и понижения конечной температуры T_2 рабочих тел.

Открытие закона сохранения и превращения энергии ускорило формирование термодинамики, поскольку первый закон термодинамики, устанавливающий эквивалентность между теплотой и механической работой, является одним из частных выражений общего закона эквивалентных соотношений при переходах энергии из одного вида в другой.

После обобщений Л. Гельмгольца к работе Карно обратился У. Томсон (Кельвин). В своем «Докладе о теории Карно», опубликованном в 1849 г., он сделал вывод о том, что существовавшая теория тепла требует пересмотра на основе новых детальных исследований. Занимаясь ими, Томсон в трех докладах «О динамической теории тепла» (1851 г.) пришел к выводу о существовании условий, при которых превращение тепла в работу невозможно (абсолютный нуль, о котором писал Ломоносов в своих «Размышлениях о причинах тепла и холода»). К 1857 г. исследования Томсона привели его к заключению о всеобщей тенденции в природе к рассеянию энергии, и он пришел к неправильному выводу о «тепловой смерти» вселенной. «Тепловая смерть» вселенной понималась как прекращение тепловых перепадов вследствие постепенного достижения единой средней температуры для всей вселенной. В 1850 г. Р. Клаузиус в работе «О движущей силе теплоты» рассматривал теорию Карно с позиций механической теории тепла. Позднее, в 1865 г., Клаузиус, так же как и Томсон, пришел к выводу о «тепловой смерти» вселенной. Выводы о «тепловой смерти» вселенной явились следствием ограниченности обобщений без учета многих неоспоримых научных положений. Закономерности, наблюдаемые на нашей планете, были неправомерно, механически распространены на вселенную. Закономерности, наблюдаемые в энергетических преобразованиях одного ряда явлений, были без основания, чисто механически распространены на всевозможные явления природы.

Энгельс во введении в «Диалектику природы» указал на ограниченность этих механических представлений и обобщений:

«... движение материи, — писал Энгельс, — это не одно только грубое механическое движение, не одно только перемещение; это — теплота и свет, электрическое и магнитное напряжение, химическое соединение и разложение, жизнь и, наконец, сознание... Неуничтожимость движения надо понимать не только в количественном, но и качественном смысле»¹. Дальнейшее развитие науки подтвердило справед-

ливость точки зрения диалектического материализма. Открытие и исследование так называемых «белых звезд-карликов» показали формы существования материи, неизвестные в земных условиях и опровергающие всеобщность «закона» обесценивания энергии. Открытие и исследование процессов атомного распада продемонстрировали существование ранее неизвестных источников энергии, показавших, что энергия объективного мира так же неисчерпаема, как и материя.

Теория «тепловой смерти» вселенной оказалась несостоятельной; развитие науки блестяще подтвердило глубокие обобщения Энгельса.

3-3. ОТКРЫТИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Одним из важнейших научных обобщений рассматриваемого периода является открытие закона сохранения и превращения энергии. Ф. Энгельс назвал этот закон абсолютным законом природы.

Закон сохранения и превращения энергии является естественно-научной основой материалистического учения о материи и движении. Он выражает факт неуничтожаемости материи и движения и указывает на качественные превращения различных форм движения материи при количественном сохранении движения. Значение закона сохранения и превращения энергии определил В. И. Ленин, указав, что он является «установлением основных положений материализма»¹.

Сформулированный в 40-х годах XIX в. закон сохранения и превращения энергии приобрел громадное значение в процессе познания новых явлений природы. Достижения науки за последние 100 лет явились не только убедительным доказательством его справедливости, но и обогатили этот закон, еще глубже раскрыв его содержание.

Открытие закона сохранения и превращения энергии в середине XIX в. было обусловлено всем ходом общественно-экономического развития, оно явилось обобщением многочисленным научным исследованиям и опыта, накопленного практикой.

Человек с первых шагов трудовой деятельности, сталкиваясь с различными превращениями одних форм движения материи в другие, использовал энергию природы для производства материальных благ. Однако наблюдаемые человеком в течение тысячелетий взаимопревращения одних форм движения в другие не могли получить правильного объяснения.

¹ Ф. Энгельс, Диалектика природы, 1955, стр. 16.

¹ В. И. Ленин, Соч., изд. 4-е, т. 14., стр. 318.

Правда, еще передовые мыслители-материалисты древности (Демокрит, Эпикур) утверждали вечность и неуничтожаемость материи и движения. Но это утверждения, вытекавшие из логических умозрительных построений и не подкрепленные практикой, были общими, недоказательными и неконкретными. Зарождение и развитие экспериментальной науки способствовали формированию более четких представлений о материальности мира и его закономерностях. В трудах Леонардо да Винчи, Г. Галилея и других представителей мировоззрения эпохи возрождения пропагандируются мысли о сохранении материи, о единстве материальной природы мира. Принцип сохранения или «количественного постоянства» движения был сформулирован в трудах Р. Декарта. Однако в течение длительного периода принцип сохранения движения и принцип сохранения материи рассматривались вне связи друг с другом, что приводило к отрыву материи от движения. В XVIII в. в работах крупнейших английских и французских философов-материалистов выдвигались правильные положения о связи материи и движения, однако их выводы не подкреплялись убедительными опытными данными.

Такое естественно-научное обоснование неразрывности материи и движения впервые было дано М. В. Ломоносовым, который сформулировал принцип единства материи и движения как всеобщий закон природы. Обобщая свои выводы о неуничтожаемости материи и движения, Ломоносов распространял их на все явления и процессы природы. Он писал в 1744 г.: «все перемены, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что сколько чего у одного тела отнимается, столько присовокупится к другому, так ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте... сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения, ибо тело, движущее своею силою другое, столько же оной у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает». Так, более 200 лет назад М. В. Ломоносовым был впервые четко сформулирован закон сохранения массы и движения как всеобщий естественный закон природы. В 1756 г. Ломоносов экспериментально подтвердил принцип сохранения материи в форме закона сохранения массы вещества, который до сих пор остается одним из важнейших естественно-научных законов природы. Закон сохранения движения нашел свое выражение в теории теплоты, разработанной Ломоносовым.

Дальнейшее развитие производительных сил, широкое применение машин в производстве, характерное для эпохи промышленного капитализма, развитие экспериментальной науки и успехи в области познания законов природы приводят к тому, что разнообразные превращения форм движения материи начинают привлекать внимание ученых и инженеров. Новые открытия и исследования убедительно доказывают факт взаимопревращений различных форм движения материи.

Переход механического движения в теплоту был известен человечеству с древнейших времен. Расширение трудовой деятельности человека все чаще и чаще сталкивало его с фактами, наглядно иллюстрирующими превращение механической энергии в тепловую, и в частности, с фактом выделения тепла при трении. Однако отсутствие правильных взглядов на теплоту как на одну из форм энергии и господство теории теплорода в значительной степени препятствовали установлению взаимосвязей между механической и тепловой энергиями. Только широкое применение взаимопревращений тепловой и механической энергий в производственных процессах, наблюдение за этими процессами и их изучение привели к тому, что теория теплорода оказалась неспособной объяснить эти процессы.

Наиболее убедительное доказательство несостоятельности теории теплорода было дано в 1798 г. Б. Румфордом в его работе «Исследование источника тепла, возбужденного трением», где он описывает наблюдения над сверлением пушечных стволов. Румфорд обнаружил, что при сверлении пушечного ствола выделяется большое количество тепла и пушка сильно нагревается; более того, за счет теплоты, выделяемой при трении сверла о металл, Румфорду удалось довести до кипения воду, наполнявшую деревянный ящик, окружавший ствол пушки. Румфорд пришел к правильному выводу о том, что источником теплоты может быть только механическое движение (трение), что выделение теплоты продолжается до тех пор, пока осуществляется движение, т. е., иными словами, указал на наличие связи между затраченной работой и выделяющимся теплом.

Вскоре опытами Х. Дэви (1799 г.) и В. В. Петрова (1804 г.) было показано расплавление льда от трения при температуре среды ниже температуры таяния льда. Этот факт также убедительно доказывал связь между трением и теплотой. Что касается превращения тепловой энергии в

механическую, то это явление наглядно было подтверждено теплоэнергетической практикой еще в конце XVIII—начале XVIII вв., но не могло получить в то время правильного объяснения.

Теплотехническая практика сыграла исключительно большую роль в подготовке предпосылок для открытия закона сохранения и превращения энергии.

Развитие естествознания, а также накопление опыта эксплуатации тепловых двигателей постепенно подводило ученых и изобретателей к пониманию связи между затратой топлива и механической работой тепловых двигателей. К началу XIX в., когда паровая машина становится основным промышленным двигателем, возникает необходимость установления связи между затраченной теплотой и получаемой от машины полезной работой.

Дальнейшее развитие тепловых двигателей привлекло внимание ученых к теории тепла, потребовало установления количественных соотношений между механической и тепловой энергиями. Так, например, исследование причины высокого расхода топлива в паровой машине привело французского ученого С. Карно к разработке основ второго закона термодинамики, к определению механического эквивалента тепла.

В упоминавшихся выше посмертных записках С. Карно были обнаружены весьма четкие указания на эквивалентность теплоты и механической работы. Карно писал: «Тепло — не что иное, как движущая сила или, вернее, движение, изменившее свой вид; это движение частиц тел; повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, точно пропорциональном количеству исчезнувшей силы. Обратно: всегда при исчезновении тепла возникает движущая сила. Таким образом, можно высказать общее положение: движущая сила существует в природе в неизменном количестве, она, собственно говоря, никогда не создается, никогда не уничтожается; в действительности она меняет форму, т. е. вызывает по один род движения, то другой, но никогда не исчезает».

Опыты с первым источником электрического тока — вольтовым столбом, построенным в 1799 г. А. Вольта, — привели к открытию тепловых действий электрического тока: при прохождении электрического тока по проводнику последний нагревался и даже накаливался, если сечение его было незначительным. Многочисленные исследования

и эксперименты с электрическим током¹, произведенные в начале XIX в., показали, что тепловые действия тока находятся в прямой связи с размерами пластин вольтова столба и возрастают с увеличением этих размеров. Наиболее ярко тепловые действия электрического тока проявились в явлении электрической дуги, открытом В. В. Петровым в 1802 г.

Однако ввиду того что в начале XIX в. тепловые действия тока еще не могли найти практического применения, задача определения соотношения между количеством тепла и величиной тока не возникала со всей остротой. Кроме того, установление закона тепловых действий тока было невозможно из-за отсутствия приборов, необходимых для проведения подобного исследования.

Дальнейшее углубление исследований в области тепловых и электрических явлений приводит к обнаружению ряда новых фактов, убедительно доказывающих взаимосвязь между этими явлениями. Так, в 1821 г. было открыто термоэлектричество, а в 1834 г. — обратное явление, заключающееся в выделении или поглощении тепла в спае двух разнородных металлов при пропускании через этот спай электрического тока. Установление обратимости тепловых и электрических явлений было важным завоеванием науки и еще одним доказательством взаимной связи и взаимопревращений явлений природы.

Успехи в области техники электрических измерений позволили в начале 40-х годов XIX в. установить количественные характеристики теплового действия тока. В 1841—1842 гг. был открыт закон теплового действия тока, явившийся частным случаем сформулированного спустя несколько лет закона сохранения и превращения энергии.

Обнаружение в 1820 г. действия электрического тока на магнитную стрелку привлекло внимание многих ученых и явилось толчком к исследованиям, приведшим к установлению связи между электрическими и магнитными явлениями. Наиболее ярко эта связь проявилась в явлении электромагнитной индукции.

Опираясь на достижения науки и практики, М. Фарадей пришел к важному обобщению о единстве различных форм энергии; он уверенно искал доказательства взаимопревращений электричества и магнетизма и нашел это до-

¹ Подробнее о развитии электротехники в этот период см. в гл. 4.

казательство в электромагнитной индукции. Критикуя сторонников контактной теории электричества, выдвинутой А. Вольта для объяснения действия вольтова столба и противоречащей закону сохранения энергии, Фарадей заявил о невозможности возникновения энергии из ничего и указал на взаимные переходы одного вида энергии в другой: «Контактная теория полагает, что сила ... может будто бы возникнуть из ничего ... Мы имеем много процессов, при которых внешняя форма силы может претерпевать такие изменения, что происходит явное превращение ее в другую. Так, мы можем превратить химическую силу в электрический ток, а электрический ток — в химическую силу. Прекрасные опыты Зеебека и Пельтье показывают взаимную связь теплоты и электричества, а Эрстеда и мои собственные показывают превращаемость электричества и магнетизма. Но ни в одном случае, даже с электрическим углем и скатом, нет производства силы без соответствующего израсходования чего-либо, что питает ее».

Фарадей близко подходил к открытию закона сохранения энергии, подчеркивая возможность определения эквивалентов при переходе одного вида энергии в другой: «Нужно сравнить количество материальных сил (т. е. сил электричества, тяготения, химического сродства, сцепления и т. д.), где возможно дать выражение для их эквивалентов в той или иной форме», — писал он в 1837 г. в своем дневнике.

Углубление исследований в области электромагнитных процессов привело к установлению их энергетических основ; в 1833 г. Э. Х. Ленц сформулировал носящий его имя закон, являющийся одним из проявлений закона сохранения и превращения энергии в области электромагнитных явлений.

В своей статье «О некоторых опытах из области гальванизма» (1838 г.) Ленц писал: «Каждый электромагнитный опыт может быть обращен таким образом, что он приведет к соответствующему магнитоэлектрическому опыту. Для этого нужно только сообщить проводнику гальванического тока каким-либо иным способом то движение, которое он совершает в случае электромагнитного опыта, и тогда в нем возникнет ток направления, противоположного направлению тока в электромагнитном опыте».

Закон Ленца наглядно иллюстрирует принцип сохранения энергии при взаимных превращениях механической и электромагнитной энергий. Действительно, если замкнутый

проводник под действием внешней силы будет приближаться к магниту, то в этом проводнике наводится ток, т. е. механическая энергия перемещения проводника преобразуется в электромагнитную энергию наведенного тока. Направление наведенного тока в соответствии с законом Ленца будет таким, что ток станет препятствовать движению проводника; этот вывод Ленца полностью соответствует закону сохранения энергии, т. е. избыток механической работы, затрачиваемой на приближение замкнутого проводника к магниту, по сравнению с расходом работы при передвижении проводника в отсутствие магнита и является источником электромагнитной энергии наведенного тока.

В основе воззрений Ленца лежали четкие представления о взаимопревращениях электрической и механической энергий; формулируя свой закон, Ленц подчеркнул обратимость электрических и магнитных явлений, он указал, что каждое магнитоэлектрическое явление (т. е. возникновение тока при движении проводника в магнитном поле) может быть сведено к электромагнитному явлению (т. е. взаимодействию проводника с током и магнитного поля). Л. Г. Гельмгольц в своем сочинении «О сохранении силы» дал вывод электродвижущей силы (э. д. с.) индукции, основываясь на математическом выражении закона Ленца.

Помимо указанных примеров, можно было бы привести множество других, наглядно иллюстрирующих взаимопереходы различных видов энергии. Достижения науки и практики показывали тесную связь между качественно различными явлениями природы и их взаимопревращениями и тем самым создали возможности для решения задачи об установлении эквивалента при переходе энергии из одной формы в другую. Необходимость решения такой задачи диктовалась запросами развивающегося машинного производства, основанного на превращениях энергии.

Этим и объясняется тот факт, что к открытию закона сохранения и превращения энергии почти одновременно подошли ученые разных стран: С. Карно во Франции, Р. Ю. Майер и Гельмгольц в Германии, Дж. П. Джоуль в Англии и др.; весь ход исторического развития создал предпосылки для открытия закона сохранения и превращения энергии.

К началу 40-х годов XIX в. принцип сохранения и превращения энергии был сформулирован рядом ученых применительно к отдельным наблюдавшимся ими явлениям.

Со всей остротой назрела необходимость обобщения многочисленных выводов и наблюдений, что и было сделано в трудах Майера, Джоуля, Гельмгольца и др.

Среди трудов указанных деятелей работы Майера являются наиболее обобщающими, поэтому остановимся на их содержании более подробно.

Р. Майер уже в первой работе «О количественном и качественном определении сил», написанной в 1841 г. и опубликованной посмертно в 1881 г., делает попытку обобщения своих воззрений на взаимное превращение различных форм движения материи. Он писал: «Движение, теплота и, как мы намерены показать в дальнейшем, электричество представляют собой явления, которые могут быть сведены к одной силе, которые измеряются друг другом и переходят друг в друга по определенным законам».

В следующем труде «Замечание о силах неживой природы», опубликованном в 1842 г., Майер на основе измерения теплоемкости газов (нагревание газов осуществлялось им при постоянном объеме, когда газ не совершал работы, и при постоянном давлении, когда часть подводимого к газу тепла расходовалась на работу расширения газа) определяет механический эквивалент тепла, равный по его подсчетам $367 \text{ кг} \cdot \text{м/ккал}$.

Здесь же он приблизился к понятию энергии в современном смысле слова. Несмотря на то, что термин «энергия» у Майера отсутствует, в отличие от многих своих предшественников он вкладывает в термин «сила» новый смысл: так, говоря о «силе падения», Майер отмечает, что для того, чтобы тело могло падать, недостаточно одной его тяжести, прежде всего необходимо это тело поднять (т. е. под «силой падения» Майер понимает потенциальную энергию тела). Майер также подчеркнул мысль о неуничтожимости и качественном взаимопревращении «сил». «Имеющиеся налицо силы, — говорит Майер, — не могут превратиться в нуль, а только перейти в другую форму».

Эту важнейшую сторону принципа сохранения и превращения энергии — качественное изменение форм энергии при ее количественном постоянстве — Майер наиболее четко формулирует в 1845 г. в работе «Органическое движение в связи с обменом веществ». Он писал: «Можно доказать и во всех случаях подтвердить на опыте, что различные силы могут превращаться друг в друга ... нигде нельзя найти ни одного процесса, где не было бы изменения сил со стороны их формы»,

Именно качественную сторону смен форм движения подчеркивает Энгельс, раскрывая сущность закона сохранения и превращения энергии. В «Диалектике природы» он отметил, что «Количественное постоянство движения было высказано уже Декартом и почти в тех же выражениях, что и теперь (Клаузиусом, Робертом Майером?). Зато превращение формы движения открыто только в 1842 г. (имеется в виду появление работы Майера — Авт.), и это, а не закон количественного постоянства, есть новое»¹.

Иллюстрируя свою мысль, Майер приводит 25 примеров взаимных превращений качественно различных «сил» (энергии) и в том числе «превращение электричества в тепло и механический эффект» и обратный пример, когда «тепло превращается в электричество» и «механический эффект превращается в электричество». Точно так же он иллюстрирует многими примерами «превращение тепла в механический эффект» и «превращение механического эффекта в тепло».

Критикуя теорию «невесомых»: теплорода, электрической и магнитной жидкостей, Майер утверждает: «Выскажем великую истину: не существует никаких нематериальных материй».

В этой же работе Майер даст еще одну формулировку закона сохранения: «Количественная неизменность данного есть верховный закон природы, распространяющийся равным образом как на силу, так и на материю».

Экспериментальное подтверждение эквивалентности тепловой и механической энергий было убедительно дано Д. П. Джоулем. В течение 1843—1850 гг. Джоулем был опубликован ряд работ, в которых описывались предложенные им методы определения механического эквивалента тепла. Из всех этих методов наиболее совершенным явился последний, описанный в работе 1850 г. В металлический калориметр (рис. 3-44) наливалась вода, в которую опускалась металлическая ось с укрепленными на ней лопастями. К стенкам калориметра прикреплялись специальные пластины, препятствовавшие движению всей массы воды при вращении лопастей. Вращение оси осуществлялось за счет опускания грузов, связанных веревкой через блок. Измеряя работу падения грузов и изменение температуры воды, нагреваемой движущимися лопастями, Джоуль нашел значение механического эквивалента

¹ Ф. Энгельс, Диалектика природы, 1955, стр. 224—225.

тепла, равное $424,3 \text{ кГ} \cdot \text{м/ккал}$. Кроме Джоуля, механический эквивалент тепла был экспериментально определен многими другими исследователями.

Математическое доказательство принципа «сохранения сил» было дано Г. Л. Гельмгольцем в 1847 г. в его труде «О сохранении силы». Исходя из невозможности создания *perpetuum mobile*, Гельмгольц определяет «соотношения», существующие между «различными силами природы», и дает математические выражения для различных случаев взаимопревращения «сил» (энергии). Говоря о цели своей

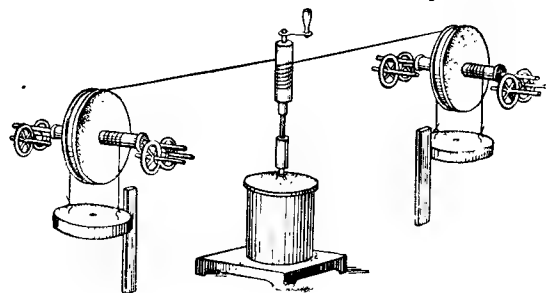


Рис. 3-44. Прибор Джоуля для определения механического эквивалента теплоты.

работы, Гельмгольц писал: «Мы исходим из допущения, что невозможно при существовании любой произвольной комбинации тел природы получить непрерывно из ничего движущую силу... Задачей настоящего сочинения является проведение указанного принципа... через все отделы физики».

Математическая трактовка принципа сохранения энергии составляет основную ценность работы Гельмгольца: что же касается его философских обобщений, то они во многом уступали обобщениям Майера. Гельмгольц сводил все явления природы к механическому движению, характеризуя материю как систему материальных точек, между которыми действуют силы притяжения и отталкивания. Подобное воззрение Гельмгольца привело его к ограниченной количественной трактовке закона сохранения энергии, к непониманию качественных взаимопревращений различных форм энергии, тогда как самые сильные стороны обобщений Майера состоят именно в утверждении качественных изменений, взаимопереходов одной формы движения в другую.

Открытие закона сохранения и превращения энергии наносило «серьезный удар по механистическим воззрениям, отвергавшим наличие качественно различных форм движения материи. Установление взаимосвязи и взаимопревращения форм движения материи при количественном сохранении движения опрокидывало укоренившиеся представления об изолированных, обособленных «силах» природы.

Уже в работах Майера обнаруживается попытка вложить новый энергетический смысл в понятие «сила». Само содержание закона о превращении форм движения требовало установления нового понятия, выражающего это содержание. Таким новым физическим понятием явилось понятие об энергии, современное значение которого вместе с термином «энергия» было введено впервые У. Томсоном (Кельвином) в 1860 г.

Однако господство метафизического мировоззрения среди ученых XIX в. долгое время препятствовало правильному пониманию сущности закона сохранения и превращения энергии, который трактовался чаще всего лишь с количественной стороны.

Только опираясь на диалектический материализм, можно было раскрыть всю глубину содержания закона сохранения энергии. Эта задача была выполнена Энгельсом, который впервые дал всесторонний марксистский анализ закона сохранения и превращения энергии, показав, что этот закон выражает не только количественное сохранение движения, но — и это главное — качественное превращение форм движения материи.

Само название закона — «закон сохранения и превращения энергии» — было предложено Энгельсом в отличие от названия «закон сохранения сил», распространенного до появления работ Энгельса. Энгельсу также принадлежит раскрытие содержания понятия энергии как меры движения материи.

— ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Электротехника — это область техники, охватывающая вопросы производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии в народном хозяйстве и быту.

Как известно, первые наблюдения электрических и магнитных явлений относятся к глубокой древности, но только в начале XIX в. создались предпосылки для практических

применений электричества и магнетизма. Эти предпосылки были связаны как со все более возрастающим интересом к электрическим и магнитным явлениям со стороны развивающегося производства, так и с успехами теоретических и экспериментальных исследований в области изучения этих явлений.

История электротехники насчитывает немногим более полутора столетий. Она ведет свое начало от создания первого источника электрического тока (1800 г.). До 1800 г. были сделаны только первые шаги от наблюдений электрических и магнитных явлений до создания простейших электростатических машин и приборов и установления некоторых закономерностей в области статического электричества и магнетизма. Этот период характеризуется *становлением электростатики*.

Период с 1800 по 1830 г. характеризуется открытием электрического тока и первоначальным изучением его действий, установлением ряда закономерностей в области электромагнетизма, а также первыми опытами практического применения электричества. В это время был заложен *фундамент электротехники, ее научные основы*.

С открытием явлений электромагнитной индукции начинается новый этап в развитии электротехники (1831—1870 гг.), завершившийся созданием первого промышленного генератора электрической энергии. Электрические и магнитные явления находят разнообразное применение для целей практики. Это был *период зарождения электротехники*.

Третий этап в развитии электротехники (1870—1891 гг.) начинается внедрением в промышленность электромашинного генератора постоянного тока и завершается многочисленными исследованиями в области многофазных систем. Это—период интенсивного развития электротехники в условиях децентрализованного производства электроэнергии и начального развития электростанций, период возникновения электроэнергетики. В это время начинается *становление электротехники как самостоятельной отрасли техники*.

После 1891 г., когда была решена проблема передачи электроэнергии на расстояние трехфазным током, разработаны промышленные типы трансформатора и асинхронного двигателя, создались условия для широкого *развития электрификации*. С этого времени начался четвертый этап в развитии электротехники, продолжающийся до настоящего времени.

В данной главе будет рассмотрено развитие электротехники до 70-х годов XIX в. Несмотря на то, что в этот подготовительный период развивалась не столько собственно электротехника, сколько электрофизика, следует кратко познакомиться с достижениями науки в указанной области с тем, чтобы лучше понять последующее развитие электротехники.

4-1. СТАНОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

Первые известные нам наблюдения электрических и магнитных явлений относятся к VII—VI вв до нашей эры и связаны с именем греческого философа Фалеса. Фалесу было известно не только свойство магнита притягивать железо; он обнаружил, что янтарь, натертый мехом, может притягивать легкие тела.

В течение многих веков представления о сущности магнитных и электрических явлений были очень примитивны-

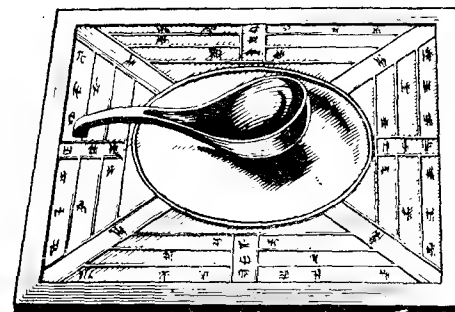


Рис. 4-1. Китайский компас.

ми. Несмотря на это, магнит получил практическое применение еще до нашей эры в странах древнейшей культуры — Китае и Индии (рис. 4-1).

Развитие экспериментальной науки в XIII—XVI вв. способствовало расширению исследований в области электричества и магнетизма. Первое научное сочинение о магнитных и электрических явлениях принадлежит английскому ученому У. Гильберту, выпустившему в 1600 г. свой труд «О магните, магнитных телах и о большом магните—Земле». Гильберт ввел в науку термин «электричество», назвав «электрическими» тела, способные электризоваться. Дальнейшее изучение электрических явлений привело к созданию разнообразных электростатических машин и при-

боров. Среди них следует отметить: первую электростатическую машину (1650 г., рис. 4-2), лейденскую банку (конденсатор) (1745 г.), электроизмерительный прибор Ломоносова (рис. 4-3), электрический указатель Г. В. Рихмана — первый прибор непосредственной оценки (1745 г., рис. 4-4), крутильные весы Ш. О. Кулона¹ (1785 г., рис. 4-5) — один из наиболее точных приборов своего времени.

К концу XVIII в. уже был установлен закон взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов (закон



Рис. 4-2. Электростатическая машина Герике.

Справа изображен серый шар, укрепленный на оси, который наэлектризовывался при вращении его ладонями рук.

Кулона), открыто явление электростатической индукции, доказан электрический характер грозовых явлений в атмосфере, разработан ряд теорий электричества, обнаружено действие электричества на живые организмы, сделаны попытки установления связи между электрическими и магнитными явлениями. Наметился переход от качественных наблюдений к установлению количественных связей и закономерностей.

Несмотря на значительный интерес к изучению электрических явлений и некоторые успехи в этой области, достигнутые к концу XVIII в., они в то время не могли еще полу-

¹ Крутильные весы были изобретены ранее, а Кулон их впервые использовал для электрических и магнитных измерений.

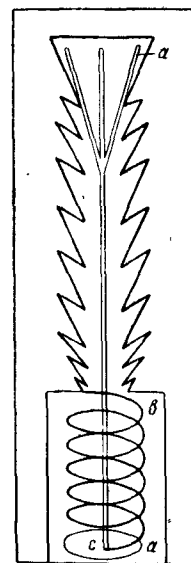


Рис. 4-3. Прибор Ломоносова для определения интенсивности электрических атмосферных разрядов.

Получив одноименный заряд, витки пружины *ab* стремятся оттолкнуться, увлекая за собой пластинку с укрепленным на ней стержнем. Степень опускания стержня фиксировалась с помощью "усов" *d*, упавших в выступы, сделанные в станине прибора.

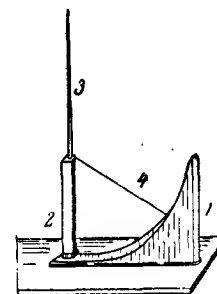


Рис. 4-4. Электрический указатель Рихмана

1 — деревянный квадрант с делениями; 2 — металлическая линейка, соединявшаяся с металлическим шестом 3, установленным на крыше дома; 4 — льняная нить, отклонявшаяся от наэлектризованной линейки.

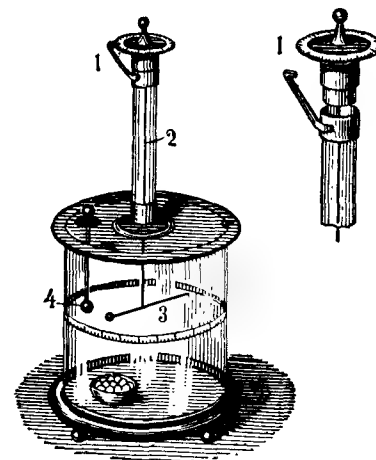


Рис. 4-5. Крутильные весы Кулона.

1 — микрометрический круг с указателем и клеммой для подвешивания металлической нити 2, на которой висит стрелка 3 с бузиновым шариком; 4 — неподвижный бузиновый шарик, заряжаемый положительным или отрицательным электричеством и взаимодействующий с подвижным шариком стрелки 3. Эту силу взаимодействия можно определить по углу кручения нити.

чить заметного практического применения. Это объясняется, с одной стороны, тем, что запросы производства вполне удовлетворялись механической системой распределения энергии; с другой стороны, электростатические машины, дававшие ничтожные количества электричества, не могли служить в качестве источника электрической энергии; кроме того, степень познания законов природы, в частности закономерностей электромагнитных явлений, была совершенно недостаточной для того, чтобы эффективно использовать электроэнергию.

Первоначально были сделаны попытки применить одно из замечательных свойств электричества — способность распространяться по проводнику с большой скоростью. Были разработаны конструкции электростатических телеграфов для передачи сигналов на расстояние. Однако такие телеграфы успеха не имели вследствие значительных трудностей, связанных с передачей и использованием электростатических зарядов. Из всех попыток практического применения статического электричества наиболее удачными были опыты использования его для целей медицины. В многочисленных трудах конца XVIII—начала XIX вв. описывались разнообразные электростатические машины и приборы, предназначенные для электролечения. Эти работы имели большое значение для расширения познаний в области электричества, способствовали выявлению электроизоляционных свойств некоторых материалов (стекло, сургуч, смола, хлопчатобумажные ткани, шелк), вызывали интерес к более углубленному изучению электрических явлений. Подобное же значение имело и устройство молниеотводов, получивших большое распространение с середины XVIII в. благодаря главным образом трудам В. Франклина в Америке, М. В. Ломоносова и Г. Рихмана в России, Проккопа Дивиша (Чехия) и др.

Успехи в изучении электрических и магнитных явлений, достигнутые к концу XVIII в., явились базой для последующих, более глубоких исследований в этой области.

4.2. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И ИЗУЧЕНИЕ ЕГО СВОЙСТВ

Расширение исследований в области электричества и магнетизма, начавшееся после промышленного переворота, привело на рубеже XIX в. к открытию электрического тока и созданию первого источника постоянного электрического тока — вольтова столба.

Вольтов столб

Вольтов столб был создан итальянским ученым А. Вольта в 1799 г. Изучая опыты итальянского анатома Л. Гальвани, обнаружившего сокращение мышц препарированной лягушки при соприкосновении их с вскрытого нерва с двумя разнородными металлами и объяснявшего это явление действием особого, присущего животному организму так называемого «животного» электричества, Вольта пришел к другому выводу. Отвергая идею «животного» электричества, Вольта утверждал, что лягушка в опытах Гальвани «есть чувствительнейший электрометр», а источником электричества является контакт двух разнородных металлов. Эти соображения и были положены Вольта в основу его теории «контактного электричества». Однако многочисленные эксперименты убедили Вольта в том, что простого контакта металлов недостаточно для получения сколько-нибудь заметного тока; выяснилось, что непрерывный электрический ток может возникнуть лишь в замкнутой цепи, составленной из различных проводников: металлов (которые он называл проводниками первого класса) и жидкостей (названных им проводниками второго класса).

Вольтов столб представлял собой простейшую батарею гальванических элементов с одной жидкостью: между парами цинковых и медных пластин (дисков) прокладывались сухонные кружки, смоченные щелочью или кислотой (рис. 4-6).

Вольта не удалось понять того факта, что электрический ток возникает в результате химических процессов между металлами и жидкостями. Он по-своему объяснял необходимость применения наряду с твердыми проводниками — металлами — жидких проводников. По его мнению, при соприкосновении двух различных металлов возникает «электровозбудительная» или «электродвижущая» сила, под действием которой электричество одного знака сосредоточивается на одном из металлов, а электричество про-

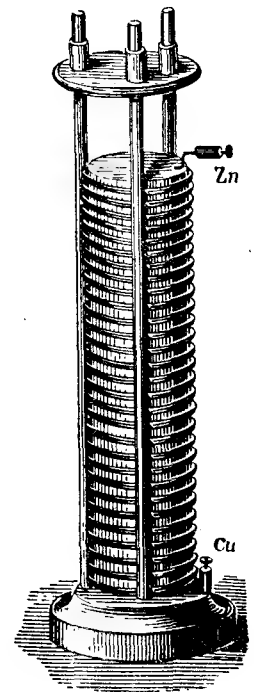


Рис. 4-6. Вольтов столб.

твояположного знака—на другом. Если составить столб из нескольких пар различных металлов, например цинка и серебра (без прокладок), то каждая цинковая пластина, заряженная электричеством одного знака, будет находиться в соприкосновении с двумя одинаковыми серебряными пластинами, заряженными электричеством противоположного знака, и их общее действие будет взаимно уничтожаться. Для того чтобы действие отдельных пар суммировалось, необходимо обеспечить соприкосновение каждой цинковой пластины только с одной серебряной, т. е. исключить встречный металлический контакт. Это осуществляется с помощью проводников второго класса (влажных суконных кружков); такие кружки разделяют пары металлов и в то же время не препятствуют движению электричества. Таким образом, Вольт, не поняв действительной причины возникновения тока, практически пришел к созданию гальванического элемента, действие которого основывалось именно на превращении химической энергии в электрическую.

Создание первого источника электрического тока сыграло громадную роль как в развитии науки об электричестве и магнетизме, так и в расширении их практических приложений. Ф. Энгельс указывал, что «Открытие гальванического тока... имеет для учения об электричестве по меньшей мере такое же значение, как открытие кислорода для химии»¹. Современник Вольты французский ученый Д. А. Араго считал вольтов столб «самым замечательным прибором, когда-либо изобретенным людьми, не исключая телескопа и паровой машины».

В течение 2—3 лет после создания вольтова столба рядом ученых было разработано несколько различных модификаций батарей гальванических элементов.

Среди разнообразных конструкций вольтова столба особенного внимания заслуживает «огромная наипаче» гальваническая батарея, построенная в 1802 г. В. В. Петровым.

Изучив труды своих предшественников в области электричества, Петров пришел к логичному выводу о том, что более полное и всестороннее изучение явлений электрического тока возможно при наличии крупных гальванических батарей, действия которых будут более интенсивными и легче наблюдаемыми. В то время как распространенные за рубежом гальванические батареи состояли из нескольких десятков или сотен пластин, Петров построил батарею, состоявшую из 4 200 медных и цинковых пластин, или 2 100

медно-цинковых элементов, соединенных последовательно.

Эта батарея (рис. 4-7) располагалась в большом деревянном ящике, разделенном по длине на четыре отделения; для изоляции пластины стенки ящика и разделяющих перегородок были покрыты сургучным лаком. Общая длина батареи составляла 12 м — это был уникальный для своего времени источник электрического тока. Как показали современные эксперименты с моделью батареи Петрова, э. д. с. ее составляла около 1 700 в, а максимальная полезная мощность — 60—85 вт. Именно благодаря применению источника тока высокого напряжения Петрову в 1802 г. впервые удалось наблюдать явление электрической дуги. Точно так же Дэви смог наблюдать электрическую дугу только после того, как в 1808 г. он построил большую гальваническую батарею, состоявшую из 2 000 элементов.

Многочисленные эксперименты с вольтовым столбом, проводившиеся учеными разных стран, не могли не привести уже в течение первых 2—3 лет после создания столба к открытию химических, тепловых, световых и магнитных действий электрического тока.

Химические действия
тока

Уже в 1800 г. был впервые осуществлен (англичанами А. Карлейлем и У. Никольсоном) электролиз воды, а затем и других жидкостей. В процессе электрохимических исследований удалось выявить электропроводность и физико-химические свойства различных веществ. Так, например, В. В. Петров в своем труде «Известие о гальвани-вольтовых опытах» (СПБ, 1803 г.) описывает опыты по электролизу жидких (растительных) масел, в результате которых им были обнаружены высокие электроизоляционные свойства этих масел. Как известно, масла позднее получили широкое применение в качестве электроизоляционного материала. Он также установил, что сера и фосфор являются «худыми» проводниками электричества. Желая продемонстрировать явление электролиза одновременно в несколь-

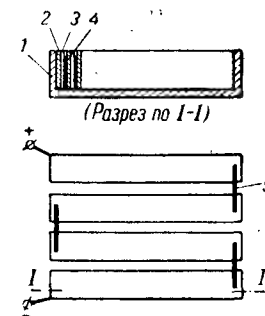


Рис. 4-7. Схема расположения и соединения элементов в батарее Петрова.

1 — деревянный ящик; 2 и 3 — медный и цинковый кружки; 4 — прокладка; 5 — медные дужки, соединяющие части батареи.

¹ Ф. Энгельс, Диалектика природы, 1945, стр. 85.

ких трубках с водой, Петров впервые применил параллельное соединение приемников тока.

Большое значение для расширения практических применений электричества сыграло открытие в 1807 г. Х. Дэви электролитического способа получения щелочных металлов — калия и натрия, ранее неизвестных в чистом виде;

в 1808 г. Дэви таким же путем получил магний, барий, стронций, кальций.

В 1807 г. было открыто еще одно действие тока — электроосмос. Профессор Московского университета Ф. Ф. Рейс обнаружил, что при пропускании электрического тока через воду, налитую в колена U-образной трубки, изгиб которой заполнялся порошкообразным нерастворимым веществом, начинается движение воды через эту пористую перегородку, причем в колене, соединенном с отрицательным полюсом

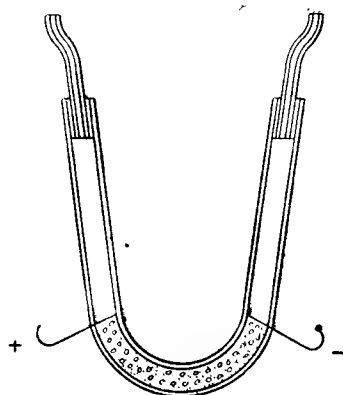


Рис. 4-8. Схема опыта Рейса.

батареи, вода поднимается, а в другом колене — опускается (рис. 4-8). В то время Рейсу не удалось объяснить причины этого явления, но позднее оно было изучено более подробно. В настоящее время электроосмос широко применяется в технике, в частности для осушки намывных грунтов (электродренаж).

Указанные открытия наглядно иллюстрировали практическую ценность электрохимических действий тока и еще больше усилили интерес ученых к этой области явлений. Необходимость объяснения происходивших процессов привела к разработке теорий электролиза. Одним из важнейших обобщений, сделанных в этот период в электрохимии, явилось установление законов электролиза (Фарадей, 1833—1834 гг.). Терминология, предложенная Фарадеем (электрод, анод, катод), сохранилось до настоящего времени.

Тепловые действия тока

Тепловые и световые действия тока первоначально были обнаружены при накаливании металлического проводника током и в виде искр различных длин и яркостей. Наиболее эффективным проявлением тепловых и световых дей-

ствий тока была электрическая дуга. В труде В. В. Петрова «Известие о гальвани-вольтовых опытах», изданном в 1803 г., мы впервые находим прямое указание на возможность применения электрической дуги для целей освещения, плавки металлов и восстановления металлов из их окислов. До этого никто так ясно и четко не указывал и не доказывал возможность практического применения электричества.

Существенное значение для выявления взаимосвязей между различными явлениями природы и, в частности, для открытия закона сохранения и превращения энергии имело открытие термоэлектричества (1821 г., Т. Зеебек). Это явление заключалось в том, что при подогревании или охлаждении одного из спаев двух разнородных металлических пластинок возникает электрический ток в контуре, образованном этими пластинками. Вскоре было установлено (А. С. Беккерелем), что термоэлектрический ток может возникнуть не только при употреблении разнородных металлов, но и при различии в структуре и плотности проводника по обе стороны от нагреваемого места.

В течение длительного времени термоэлементы вследствие их крайней неэкономичности и малой удельной производительности получали применение лишь для измерения температур (термопары). Только в последние годы благодаря успехам в области науки о полупроводниках созданы предпосылки для разработки более экономичных термоэлементов.

В 1834 г. (Ж. Ш. Пельтье) была установлена обратимость термоэлектрических процессов, что при прохождении электрического тока через спай двух различных металлов имеет место выделение или поглощение тепла в зависимости от направления тока. Успехи в области техники электрических измерений позволили в начале 40-х годов XIX в. найти количественные характеристики теплового действия тока. Эта задача была решена в 1841—1842 гг. в законе теплового действия тока, открытого независимо друг от друга Дж. П. Джоулем и Э. Х. Ленцем. Закон Джоуля—Ленца явился частным случаем закона сохранения и превращения энергии в электрической цепи.

Магнитные действия тока

Особенно важное значение для развития электротехники имело открытие магнитных действий тока.

Первые наблюдения отклонения свободно подвешенной магнитной стрелки, находящейся вблизи проводника с то-

ком, относятся к 1802 г. (итальянский физик Д. Д. Романь-ози), однако в то время это явление не получило должной оценки. Расширение и углубление исследований электрического тока позволили по-новому оценить опубликованную в 1820 г. брошюру датского физика Г. Х. Эрстеда, в которой описывались наблюдавшиеся им отклонения магнитной стрелки под действием электрического тока. Интерес, проявленный к открытию магнитных действий тока со стороны ученых разных стран, способствовал более глубокому изучению этих явлений и установлению ряда важных закономерностей. Уже в том же 1820 г. были обнаружены (Д. Ф. Араго) явление намагничивания проводника протекающим по нему током, а также усиление эффекта намагничивания при замене прямолинейного проводника проволоочной спиралью — соленоидом.

Новым важным шагом от качественных наблюдений магнитных действий электрического тока к определению количественных зависимостей и закономерностей явилось установление в 1820 г. французскими учеными Ж. Б. Био и Ф. Саваром закона действия тока на магнит¹. Этот закон вскрывал новый, ранее неизвестный в науке характер взаимодействий между двумя материальными телами, определяя «равнодействующую всех сил, исходящих из провода», как вектор, направленный перпендикулярно плоскости, в которой находится проводник с током. Установленная закономерность позволила объяснить вращательный характер движения проводника относительно магнита или магнита относительно проводника.

Крупным научным событием рассматриваемого периода явились разработка основ электродинамики и установление электрической природы магнетизма А. Ампером. Основываясь на том, что катушка или кольцевой проводник с током, аналогичны магниту, Ампер пришел к выводу об идентичности взаимодействия кольцевых проводников и взаимодействия магнитов. Эксперименты подтвердили выводы Ампера. От кольцевых токов Ампер перешел к линейным токам и показал, что в зависимости от направления токов², протекающих в двух проводниках, эти проводники будут или

¹ Позднее этот закон был уточнен французским ученым П. Лапласом.

² Понятие о направлении тока было введено Ампером, который предложил считать положительным направление тока, текущего от положительного полюса источника к отрицательному.

притягиваться друг к другу, или отталкиваться. Обнаруженные явления были названы Ампером «электродинамическими» в отличие от электростатических явлений.

Обобщая результаты своих экспериментальных работ, Ампер вывел математическое выражение, характеризующее силу взаимодействия двух токов (уравнение Ампера), подобно тому как это сделал Кулон в отношении взаимодействия электрических зарядов. Электродинамическая теория Ампера изложена им в сочинении «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта», изданном в Париже в 1826—1827 гг.*.

На основании результатов своих исследований, а также трудов предшественников Ампер пришел к принципиально новому выводу о причине явлений магнетизма. Он отрицал существование особых магнитных жидкостей и утверждал, что магнитное поле имеет электрическое происхождение. Основываясь на тождестве действий круговых токов и магнитов, Ампер утверждал, что магнетизм какой-либо частицы обусловлен наличием круговых токов в этой частице, а свойства магнита в целом обусловлены электрическими токами, расположенными в плоскостях, перпендикулярных его оси. Разработанная Ампером гипотеза молекулярных круговых токов явилась новым прогрессивным шагом на пути к материалистической трактовке природы магнитных явлений.

Установление
основных законов
электрической цепи

По мере углубления исследований электрического тока подготавливались также и условия для перехода от качественных наблюдений явлений в электрической цепи к установлению количественных соотношений.

Впервые связь между током и сечением проводника была отмечена в 1802 г. В. В. Петровым, установившим, что при увеличении площади поперечного сечения проводника ток в цепи возрастает. В 1821 г. Г. Дэви показал, что проводимость зависит от материала и температуры проводника; он также отметил зависимость проводимости от площади сечения проводника. Более глубоко эти явления были исследованы немецким физиком Г. С. Омом.

Помещая магнитную стрелку, подвешенную на нити, около проводника с током, Ом показал, что угол кручения нити, характеризующий отклоняющее действие тока, оста-

¹ В 1954 г. Академия наук СССР издала на русском языке сочинения Ампера, куда вошел также и указанный труд. См. Академия наук СССР, Классики науки, А. Ампер, Электродинамика, 1954.

вался постоянным по всей длине проводника. На основании этих опытов Ом пришел к выводу о том, что ток в различных участках неразветвленной цепи остается неизменным.

Исследуя закономерности в электрической цепи, Ом впервые проводит аналогии между движением электричества и тепловым или водяным потоком; при этом разность потенциалов играет роль падения температур или разностей уровней. Основываясь на указанной аналогии, он осуществляет ряд экспериментов и устанавливает известный закон электрической цепи, носящий его имя. Результаты исследований Ома были опубликованы в 1827 г. в работе «Гальваническая цепь, разработанная математически доктором Г. С. Омом». Спустя два десятилетия, в 1847 г., немецким физиком Г. Р. Кирхгофом были сформулированы два закона для разветвленных электрических цепей (законы Кирхгофа).

**Открытие
и исследование
явления
электромагнитной
индукции**

Начало нового этапа в развитии электротехники относится к 1831 г. и связано с открытием явления электромагнитной индукции, ставшего источником последующих важнейших достижений в области электротехники.

К концу первой четверти XIX в. были уже доказаны взаимосвязь между различными явлениями природы и взаимопревращения различных форм движения материи: установлены тесная связь тепловой и механической, электрической и тепловой, электрической и химической форм энергии. Изучение явлений электромагнетизма также убедительно указывало на связь между электричеством и магнетизмом. Если электрический ток вызывал магнитные действия, то естественно было предположить, что и магнитные явления могут вызывать появление электрического тока. Такое предположение было впервые высказано М. Фарадеем, который был убежден в возможности взаимных превращений «сил» природы; в 1821 г. он записал в своем дневнике: «Превратить магнетизм в электричество». В результате упорных исследований Фарадей в 1831 г. показал возможность «превращения магнетизма в электричество», открыв явление электромагнитной индукции. Полгода спустя это же явление наблюдалось независимо от Фарадея американским физиком Д. Генри.

Первая серия опытов Фарадея закончилась экспериментом, демонстрировавшим явление «вольтаэлектрической» (по терминологии Фарадея) индукции (рис. 4-9,а—г). Обнаружив возникновение тока во вто-

ричной цепи при замыкании или размыкании первичной, Фарадей ставит эксперимент для выяснения свойств индуктированного тока: внутрь спирали, включенной во вторичную цепь, помещалась стальная игла (рис. 4-9,б), которая намагничивалась индуктированным током. Это говорило о том, что индуктированный ток подобен току, получаемому непосредственно от гальванической батареи.

Заменяя деревянный или картонный барабан, на который наматывались первичная и вторичная обмотки, стальным кольцом (рис. 4-9,г),

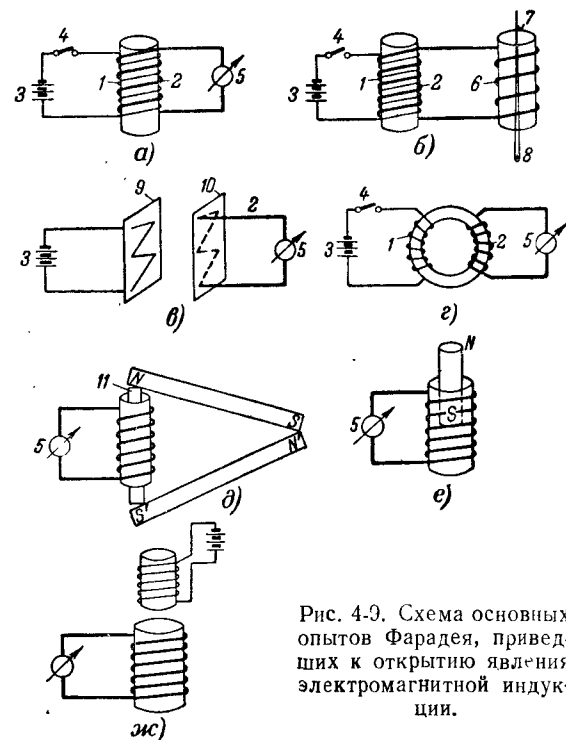


Рис. 4-9. Схема основных опытов Фарадея, приводящих к открытию явления электромагнитной индукции.

Фарадей обнаружил более интенсивное отклонение стрелки гальванометра. Этот опыт указывал на существенную роль среды в электромагнитных процессах.

Следует отметить, что в данном опыте Фарадей впервые применяет устройство, которое можно назвать прототипом трансформатора.

Вторая серия опытов иллюстрировала явление электромагнитной индукции, возникавшее при отсутствии источника тока в первичной цепи. Исходя из того, что катушка, обтекаемая током, идентична магниту, Фарадей заменил источник тока двумя постоянными магнитами (рис. 4-9,д) и наблюдал по отклонению магнитной стрелки наличие тока во вторичной обмотке при замыкании и размыкании магнитной цепи. Это явление он назвал «магнитоэлектрической индукцией»; позднее им было отмечено, что никакой принципиальной разницы между «вольта-

электрической» и «магнитоэлектрической» индукцией нет. Впоследствии оба эти явления были объединены термином «электромагнитная индукция». Один из заключительных экспериментов (рис. 4-9,е) демонстрировал появление индуктированного тока при движении постоянного магнита внутри соленоида. Именно этот опыт нагляднее других показывал возможность превращения «магнетизма в электричество» или, точнее выражаясь, механической энергии в электрическую.

Опыты Фарадея показали, что электромагнитная индукция возникает как в неподвижном проводнике, находящемся в переменном магнитном поле, так и в проводнике, который перемещается в неизменном магнитном поле. Фарадей впервые вводит представление о магнитных силовых линиях, совокупность которых составляет магнитное поле как физическую реальность. Им было доказано, что наведение тока имеет место только при пересечении магнитных силовых линий. Отсюда вытекала возможность генерирования электрического тока при перемещении замкнутого проводника в поле постоянного магнита.

Основываясь на своих исследованиях, Фарадей сумел впервые дать правильное научное объяснение явлению, известному под названием «явления Араго» или «магнетизма вращения». Это явление, обнаруженное в 1824 г. Д. Ф. Араго, заключалось в том, что при вращении медного диска, находящегося над магнитной стрелкой (или под ней), стрелка также приходит во вращение. Ни Араго, ни другие ученые, повторявшие этот эксперимент, не сумели в то время дать ему правильное объяснение. Большинство ученых считало, что это явление вызывается наведением в диске магнетизма; при этом предполагали, что полюс магнита в ближайшей к себе части пластины вызывает магнетизм противоположного знака, а в остальных местах — рассеянную полярность одноименного знака. Вместе с тем многие ученые, в том числе и сам Араго, подчеркивали тот факт, что когда магнит и диск находятся в покое, никаких явлений притяжения между ними не замечается, тогда как предполагаемый наведенный магнетизм в диске должен был бы некоторое время сохраняться.

Только открытие явления электромагнитной индукции позволило объяснить причину вращения диска в поле магнита. Фарадей, анализируя явление Араго, показал, что при вращении диска в магнитном поле в нем наводятся токи, которые и взаимодействуют с магнитом. Поскольку индукция имеет место только при взаимных перемещениях проводников и магнитов, то в состоянии покоя никаких взаимодействий между диском и магнитом быть не может.

Фарадей показал, что на основе опыта Араго можно создать новый источник электричества; следовательно, он придавал своим работам непосредственную практическую направленность, стремясь усовершенствовать существовавшие тогда способы генерирования электрического тока. В результате многочисленных опытов Фарадей построил первый электромашинный генератор, так называемый «диск Фарадея», при помощи которого можно было непрерывно генерировать электрический ток (рис. 4-10). Медный диск располагается между полюсами *N* и *S* постоянного магнита так, чтобы магнитные линии проходили через диск перпендикулярно его плоскости. При вращении диска в магнитном поле в нем наводятся электрические токи. Если на периферии диска и в его центральной части поместить токоприемники в виде скользящих контактов (щеток), то между ними при вращении диска появится разность потенциалов. При замыкании цепи между этими токоприемниками на гальванометр можно наблюдать непрерывное прохождение тока. При перемене направления вращения диска направление тока также изменяется. Это устройство представляет собой униполярную машину и является простейшим генератором постоянного тока.

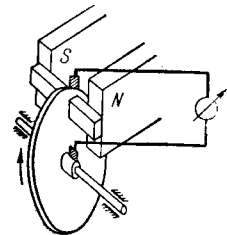


Рис. 4-10. Схема униполярного генератора Фарадея («диск Фарадея»).

Дальнейшим обобщением исследований явления электромагнитной индукции явилось установление закона о направлении индуктированного тока. Этот закон был сформулирован Э. Х. Ленцем в 1832 г. в результате многочисленных экспериментов и критического анализа трудов многих физиков, изучавших явление индукции. Ряд ученых, в том числе и Фарадей, делал попытки определить направление индуктированного тока в каждом отдельном случае; однако для некоторых взаимных положений движущихся проводников так и не удалось установить направления наведенного тока.

Закон Ленца был сформулирован им следующим образом: «Если металлический проводник движется поблизости от гальванического тока или магнита, то в нем возбуждается гальванический ток такого направления, что если бы данный проводник был неподвижным, то ток мог бы обусловить его перемещение в противоположную сторону; при

этом предполагается, что покоящийся проводник может перемещаться только в направлении движения или в противоположном направлении.

Закон Ленца имел прежде всего значение в том отношении, что давал непосредственную возможность предвидеть и определять направление наведенного тока; кроме того, этот закон позволил Ленцу сформулировать важный для электротехники принцип — обратимость генераторного и двигательного режимов электрической машины. В 1838 г. Ленц практически осуществил обратимость электрической машины постоянного тока, заставив ее работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Открытый Ленцем принцип обратимости электрической машины, как известно, является одним из фундаментальных положений электротехники. Открытие закона о направлении индуцированного тока явилось одной из предпосылок к открытию закона сохранения и превращения энергии (см. гл. 3).

4.3. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассматриваемый период в истории электротехники характеризуется началом развития электрических машин постоянного тока, созданием основ электромеханики. Важнейшими научными предпосылками электромеханики явились успехи в области изучения явлений электродинамики и открытие явления электромагнитной индукции. Накопившийся после промышленного переворота практический опыт конструирования машин и механизмов, в частности паровых двигателей, также сыграл свою положительную роль при разработке первых конструкций электрических машин и электромагнитных устройств.

Электрическая машина прошла длинный и сложный путь от физических игрушек и лабораторных приборов до законченных промышленных конструкций. Однако вначале развитие электрических генераторов и электрических двигателей шло совершенно различными путями, что вполне соответствовало состоянию науки об электричестве и магнетизме того периода: принцип обратимости электрической машины, как указывалось выше, был открыт в 30-х годах, но его использование в широких масштабах начинается лишь с 70-х годов прошлого века. В связи с этим представляется вполне правомерным рассматривать отдельно историю создания генератора и электродвигателя в период до 1870 г.

Основные этапы развития электродвигателей постоянного тока

Поскольку все первые потребители электрической энергии питались исключительно постоянным током и этот род тока был наиболее изучен, то и первые электрические машины были машинами постоянного тока.

В развитии электродвигателя постоянного тока можно наметить три основных этапа, которые ниже будут последовательно рассмотрены. Следует заметить, что это деление на этапы является условным, так как конструкции и принципы действия электродвигателей, характерные для одного этапа, в отдельных случаях появлялись вновь спустя много лет; с другой стороны, более поздние и более прогрессивные конструкции в их зародышевой форме нередко можно найти в первоначальном периоде развития электродвигателя. Следует далее иметь в виду, что для характеристики каждого этапа совершенствования электродвигателя в дальнейшем изложении приводятся только наиболее типичные конструкции.

Начальный период развития электродвигателя (1821—1834 гг.) характеризуется созданием физических приборов, демонстрирующих непрерывное преобразование электрической энергии в механическую. Первым таким прибором была установка Фарадея для демонстрации взаимного вращения магнитов и проводников с током (рис. 4-11). Исследуя взаимодействие проводников с током и магнитов, Фарадей в 1821 г. установил, что электрический ток, проходящий по проводнику, может заставить этот проводник совершать вращение вокруг магнита или вызывать вращение магнита вокруг проводника. Следовательно, опыт Фарадея являлся наглядной иллюстрацией принципиальной возможности построения электродвигателя.

Возможность превращения электрической энергии в механическую была показана и во многих других экспериментах. Так, в книге П. Барлоу «Исследование магнитных притяжений», опубликованной в 1824 г., описывалось устройство, известное под названием «колеса Барлоу» и являющееся одним из исторических памятников пред истории развития электродвигателя. Колесо Барлоу (рис. 4-12) по принципу действия представляет собой униполярную электрическую машину, работающую в двигательном режиме: в результате взаимодействия магнитного поля постоянных магнитов и тока, проходящего через оба медных зубчатых колеса, сидящих на одной оси, колеса начинают быстро

вращаться. Легко определить (пользуясь, например, правилом левой руки), что оба колеса будут вращаться в одном и том же направлении. Барлоу установил, что пере-

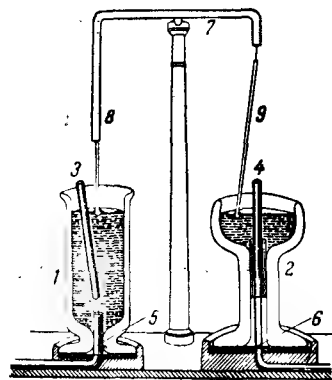


Рис. 4-11. Схема установки Фарадея для демонстрации электромагнитного вращения. 1 и 2—чашки со ртутью; 3—подвижный магнит; 4—неподвижный магнит; 8—неподвижный проводник; 9—подвижный проводник; 5 и 6—провода, идущие к батарее; 7—медный стрежень.

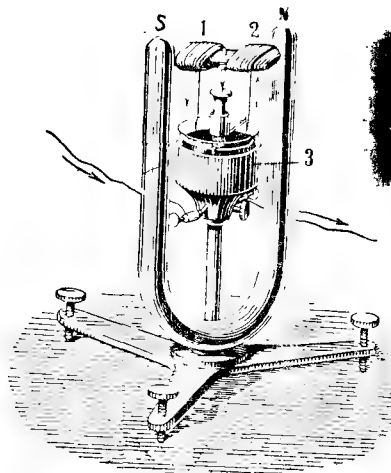


Рис. 4-13. Электродвигатель Риччи.

NS—постоянный магнит; 1 и 2—подвижный электромагнит; 3—коммутатор.

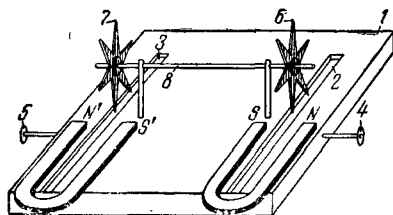


Рис. 4-12. Колесо Барлоу.

1—четырёхугольная деревянная подставка с желобками 2 и 3, наполняемыми ртутью; 4 и 5—соединительные проводники; 6 и 7—медные колеса, укрепленные на оси 8; SN и S'N'—постоянные магниты.

стве примера другой конструкции электродвигателя может служить прибор, описанный в 1833 г. английским ученым У. Риччи. Магнитное поле в этом двигателе (рис. 4-13) создавалось постоянным неподвижным подковообразным

мена контактов или перемены положения полюсов магнитов немедленно вызывает перемену направления вращения колес.

Колесо Барлоу не имело практического значения и остается до сих пор лабораторным демонстрационным прибором. В свое время оно сыграло роль, способствуя развитию экспериментов, направленных на построение практически пригодного электродвигателя. В каче-

магнитом. Между этими полюсами на вертикальной оси помещался электромагнит, по обмотке которого пропускался ток. Направление тока периодически изменялось коммутатором. Взаимодействие полюсов постоянного магнита и электромагнита приводило к вращению электромагнита вокруг оси. Описанный электродвигатель вследствие своей примитивной конструкции и незначительной мощности не мог иметь практического значения.

Характерным для первого этапа развития электродвигателя примером, отражающим иное направление в создании конструктивных форм, является прибор американского физика Дж. Генри. Генри в 1831 г. опубликовал статью «О качательном движении, производимом магнитным притяжением и отталкиванием», в которой он описал построенный им электродвигатель (рис. 4-14). Это устройство, как и колесо Барлоу, не пошло дальше лабораторных демонстраций, и сам изобретатель не придавал ему серьезного значения. В историческом аспекте электродвигатель Генри интересен тем, что в этом устройстве впервые сделана попытка использовать притяжение разноименных и отталкивание одноименных магнитных полюсов для получения непрерывного движения (в данном случае—качательного). Изменение полярности электромагнита за счет перемены направления протекающего по его обмотке тока приводило электромагнит в равномерное качательное движение. В модели, построенной самим Генри, электромагнит совершал 75 качаний в минуту. Мощность двигателей подобного типа была очень небольшой: один из таких двигателей, построенный в 1831 г., имел мощность 0,044 вт (по современному подсчетам).

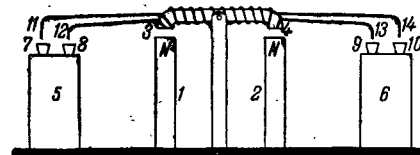


Рис. 4-14. Схема электродвигателя Генри.

1 и 2—постоянные магниты; 3 и 4—горизонтальный электромагнит, способный совершать качательное движение в зависимости от направления тока в проводниках 11—14; 5 и 6—гальванические элементы с припаянными к их электродам чашечками со ртутью 7 и 8, 9 и 10.

Как на первом этапе, так и позднее было предложено много конструкций двигателей с качательным движением якоря. Однако более прогрессивными оказались попытки построить электродвигатель с вращательным движением якоря.

Второй этап развития электрических двигателей (1834—1860 гг.) характеризуется преобладанием конструкций с вращательным движением явнополюсного якоря. Вращающий момент на валу таких двигателей обычно был резко пульсирующим.

Наиболее характерные и существенно важные работы по конструированию электродвигателей этого рода принад-

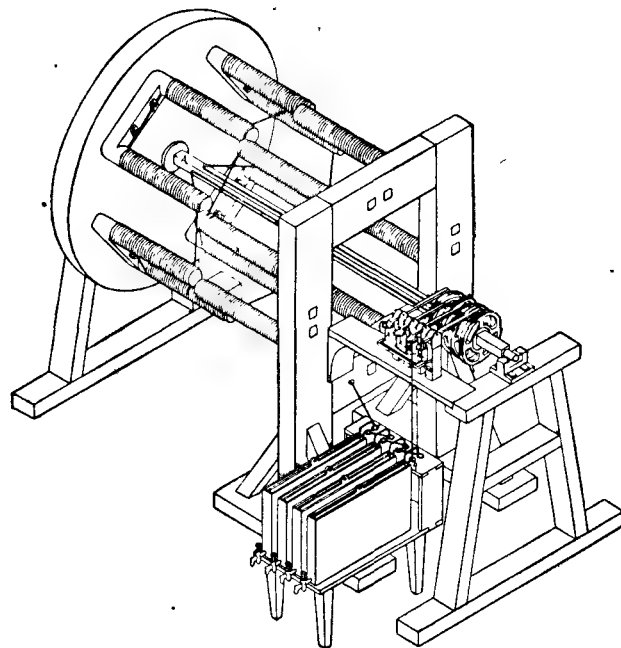


Рис. 4-15. Общий вид электродвигателя Якоби (конструкция 1834 г.).

лежат Б. С. Якоби. Изучая конструкции электродвигателей своих предшественников, в которых было осуществлено возвратно-поступательное или качательное движение якоря, Якоби отозвался об одном из них, что «такой прибор будет не больше, чем забавной игрушкой для обогащения физических кабинетов», и что «его нельзя будет применять в большом масштабе с какой-нибудь экономической выгодой». Поэтому он направил свое внимание на построение более мощного электродвигателя с вращательным движением якоря.

В 1834 г. Якоби построил и описал электродвигатель, который действовал на принципе притяжения и отталкивания между электромагнитами. Этот двигатель (рис. 4-15) имел две группы П-образных электромагнитов, из которых одна группа (четыре П-образных электромагнита) располагалась на неподвижной раме, а другая аналогичная группа — на вращающемся диске (расположен слева). В качестве источника тока для питания электромагнитов была применена батарея гальванических элементов. Для попеременного изменения полярности подвижных электромагнитов служил коммутатор.

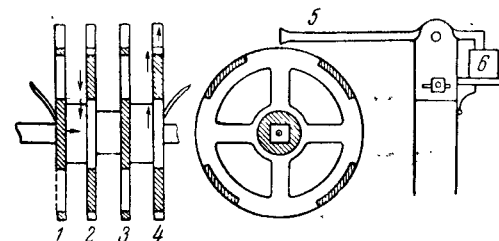


Рис. 4-16. Коммутатор двигателя Якоби.

1—4—металлические кольца; 5—скользящий контактный рычаг; 6—батарея.

Коммутатор представлял собой чрезвычайно важную и глубоко продуманную часть устройства электродвигателя Якоби. Конструктивно он представлял собой четыре металлических кольца, установленных на валу и изолированных от него (рис. 4-16); каждое кольцо имело четыре выреза, которые соответствовали одной восьмой части окружности. Вырезы были заполнены изолирующими вкладками; каждое кольцо было смещено на 45° по отношению к предыдущему. По окружности кольца скользил рычаг, представлявший собой своеобразную щетку; второй конец рычага был погружен в соответствующий сосуд со ртутью, к которому подводились проводники от батареи (сосуды со ртутью являлись наиболее распространенными в то время контактными устройствами). Таким образом, при каждом обороте кольца 4 раза разрывалась электрическая цепь. К электромагнитам вращающегося диска отходили от колец проводники, укрепленные на валу машины. Обмотки всех электромагнитов неподвижной рамы были соединены последовательно и обтекались током батареи в одном направлении. Обмотки электромагнитов вращающегося

диска были также соединены последовательно, но направление тока в них с помощью коммутатора изменялось 8 раз за один оборот вала. Следовательно, полярность этих электромагнитов также изменялась 8 раз за один оборот вала и эти электромагниты поочередно притягивались и отталкивались электромагнитами неподвижной рамы. На рис. 4-17 представлена схема коммутации электродвигателя Якоби, на которой стрелками указано направление тока для данного положения вала. Из схемы видно,

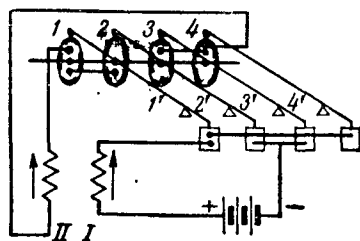


Рис. 4-17. Схема коммутации электродвигателя Якоби.

I — обмотка неподвижной рамы; *II* — обмотка подвижной рамы; *1* — *4* — кольца коммутатора; *1'* — *4'* — сосуда со ртутью. Стрелками указаны направления токов для данного положения вала.

что первое и второе, третье и четвертое кольца попарно электрически соединены между собой; также попарно соединены между собой первый и четвертый, второй и третий сосуда со ртутью. По схеме коммутации можно проследить направления токов во всех элементах электрической цепи, равно как и установить, что при повороте якоря на 45° направление тока в обмотках подвижных электромагнитов меняется на противоположное (т. е. 8 раз за каж-

дый оборот вала). По обмотке неподвижной рамы проходит ток всегда в одном направлении.

Первый электродвигатель, построенный Якоби, мог поднимать груз весом 10—12 фунтов (т. е. примерно 4—5 кг) на высоту 1 фут (примерно 30 см) в секунду, что составляло мощность около 15 вт.

Желание увеличить мощность электродвигателя привело Б. С. Якоби к созданию конструкции электродвигателя двояного типа (рис. 4-18). Этот электродвигатель имел 24 неподвижных П-образных электромагнита и 12 подвижных стержневых электромагнитов, но действовал на том же принципе, что и первый его электродвигатель. Прогрессивным в этом варианте двигателя Якоби было то, что при подобной конструкции электродвигателя подшипники разгружались от аксиальных усилий, которые возникали в первом электродвигателе при совмещении осей подвижных и неподвижных электромагнитов. Изменение конструкции, однако, не дало значительного увеличения мощности и не позволило применить электродвигатель на практике.

Нужно было искать новое конструктивное решение, которое через несколько лет и было найдено Б. С. Якоби.

Первый свой электродвигатель Якоби построил в мае 1834 г., а в ноябре того же года он представил Парижской академии наук сообщение об этом устройстве. Сообщение было прочитано на заседании Парижской академии в декабре 1834 г. и немедленно после этого опубликовано. Таким образом, известие об изобретении Б. С. Якоби очень скоро распространилось по всем странам.

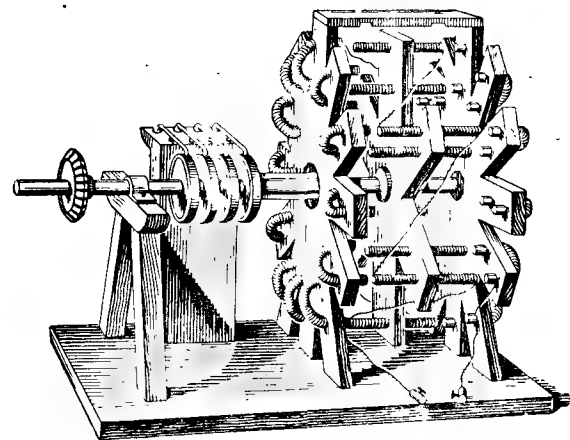


Рис. 4-18. Электродвигатель Якоби двояного типа.

В 1837 г. американский техник Т. Девенпорт также построил электродвигатель с непосредственным вращением якоря, в котором взаимодействовали подвижные электромагниты с неподвижными постоянными магнитами. В этой конструкции были некоторые прогрессивные идеи, на которые по-видимому, обратили внимание конструкторы электродвигателей, в том числе и Б. С. Якоби.

Электродвигатель Девенпорта (рис. 4-19) имел четыре горизонтальных крестообразно расположенных электромагнита, укрепленных на деревянном диске, жестко связанном с вертикальным валом. Эти электромагниты были расположены внутри двух постоянных магнитов в форме полуокружностей, опирающихся на деревянное кольцо; магниты соприкасались одноименными полюсами и создавали кольцо с двумя полюсами: *N* и *S*. На особой подставке были расположены медные пластины, разделенные посередине изоляцией; к ним подводился ток от источника пита-

ния. Концы последовательной обмотки каждой пары электромагнитов имели пружинящие контакты. Взаимодействие электромагнитов и постоянных магнитов приводило электродвигатель в работу, причем полярность электромагнитов в соответствующие моменты изменялась при помощи коммутатора.

Сравнивая электродвигатели Якоби и Девенпорта, следует отметить, что в отношении общего конструктивного

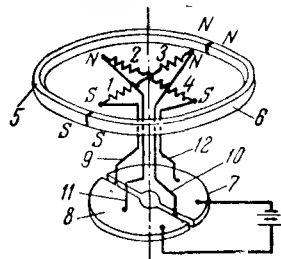


Рис. 4-19. Электродвигатель Т. Девенпорта.

1—4—подвижные электромагниты; 5 и 6—неподвижные постоянные магниты; 7—пластины коммутатора; 9—12—пружинящие контакты.

решения Девенпорт сделал шаг назад, заменив неподвижные электромагниты постоянными магнитами (которые имеют большой вес и подвержены размагничиванию). Однако в целом двигатель Девенпорта был более компактным благодаря расположению в одной плоскости подвижных и неподвижных магнитов. Если двигатель Девенпорта выполнить, например, сдвоенным, как это делал Якоби со своим двигателем, то длина вала двигателя была бы намного меньше, чем у сдвоенного двигателя Якоби. Это обстоятельство не могло не привлечь внимания Якоби, стремивше-

гося увеличить мощность своего электродвигателя при сравнительно небольшом увеличении его габаритов.

Электродвигатель Якоби, построенный в 1834 г. и описанный выше, широко демонстрировался автором и подвергался опробованию для приведения во вращение различных механизмов. Много усилий было затрачено ученым для осуществления электропривода судна. Однако опыты показали, что использование на судне в качестве источников тока гальванических батарей является неэкономичным. После того как были разработаны более совершенные генераторы тока, применение электродвигателя на автономных транспортных установках, в частности на судах, стало возможным только при наличии первичного теплового двигателя, приводящего в движение генератор.

В середине 1837 г. Якоби, состоявший тогда профессором Дерптского университета, представил в Министерство народного просвещения записку о необходимости организации исследований электродвигателей его системы. В результате этого обращения была создана «Комиссия для производства опытов относительно приспособления электромагнитной силы к движению машин по способу профессора Якоби».

В состав которой входил ряд представителей Морского ведомства (председателем Комиссии был адмирал П. Ф. Крузенштерн) и ученых (акад. Э. Х. Ленц, чл.-корр. Академии наук П. Л. Шиллинг и др.). Комиссия получила для производства опытов бот, вмещавший 12 пассажиров и рассчитанный на 10 гребцов. На этом боте предполагалось установить электродвигатель и произвести соответствующие испытания и технико-экономические подсчеты. Вначале Якоби, по-видимому, сделал попытку установить на боте свой электродвигатель конструкции 1834 г., поместив горизонтальный вал по всей ширине судна от борта до борта и разместив соответствующее число неподвижных рам и вращающихся дисков с электромагнитами. На концах этого вала, выступавших за корпус судна, должны были находиться гребные колеса. Место, которое должен был занимать такой электродвигатель на судне, как показывают подсчеты, оказалось чрезвычайно большим. Поэтому Якоби отказался от применения для опытов этого электродвигателя и приступил к разработке двигателя новой конструкции, которая была осуществлена в 1838 г.

В своем втором двигателе Якоби пошел по пути конструктивного объединения нескольких электродвигателей в один агрегат. Здесь и нашло свое практическое применение предложение Девенпорта располагать неподвижные и вращающиеся магниты в одной плоскости: объединение на общем вертикальном валу нескольких электродвигателей такой конструкции увеличивало размеры электродвигателя по вертикальному направлению, что было вполне удобно для опытной судовой установки.

Двигатель Якоби конструкции 1838 г. представлял собой комбинацию 40 небольших электродвигателей, объединенных по 20 шт. на двух вертикальных валах, установленных в деревянной станине (рис. 4-20). Модель отдельного двигателя представлена на рис. 4-21. Неподвижная часть каждого электродвигателя состояла из двух электромагнитов, изогнутых по дуге окружности и скрепленных между собой скобами из немагнитного материала; эти скобы привинчивались к деревянной станине. Каждый из таких электромагнитов занимал по длине четверть окружности кольца. Подвижная часть отдельных электродвигателей была составлена из четырех электромагнитов, расположенных крестообразно на специальной втулке.

Для питания током обмоток электромагнитов на «электрическом боте» были установлены гальванические элементы. Изменение направления тока в обмотках подвижных электромагнитов осуществлялось коммутаторами, аналогичными коммутатору первого электродвигателя, описанному выше. Посредством конических шестерен вращение с вертикальных валов передавалось на горизонталь-

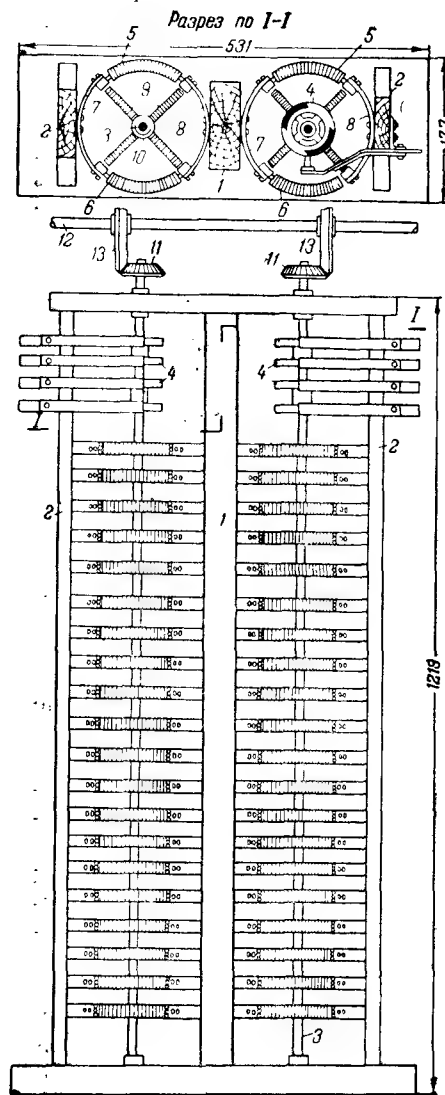


Рис. 4-2). Чертеж электродвигателя Якоби (конструкция 1838 г.).

1 и 2—стойки деревянной рамы; 3—вертикальный вал, на котором укреплялись посредством втулки 10 подвижные электромагниты 9 и кольца коммутатора 4; 5, 6—обмотки неподвижных электромагнитов; 7, 8—соединительные скобы из немагнитного материала; 11, 13—конические шестерни, передающие движение с вала 9 на горизонтальный вал 12, на котором укреплялись гребные колеса.

ный, на котором укреплялись гребные колеса, расположенные по обоим бортам «электрического бота».

Знакомство с этой конструкцией электродвигателя показывает, что Б.С. Якоби пошел по пути механического соединения определенного числа элементарных машин. Эта работа Якоби отражала типичную для середины прошлого века тенденцию в развитии электрических машин, когда ученые, не найдя еще качественно новых решений, пытались удовлетворить потребности практики простым комбинированием большого числа существовавших машин.

Испытания электродвигателей Якоби, установленного на боте, показали возможность их применения для целей практики, но в то же время обнаружили, что при питании электродвигателей током от гальванических батарей механическая энергия получается чрезвычайно дорогой; вследствие этого была признана крайняя неэкономичность электродвигателей на данном этапе развития электротехники. Необходимо отметить, что основным недостатком гальванических батарей яв-

ляется их малая энергоемкость (т. е. малая мощность на единицу веса), вынуждавшая использовать очень большое число батарей, что для многих транспортных установок является неприемлемым. Так, например, на боте Якоби вначале было установлено 320 гальванических элементов. Произведенные опыты, а также теоретическое исследование электрической машины привели Якоби к очень важному для практики выводу: разрешение вопроса о более или менее широком применении электродвигателей находится в прямой зависимости от удешевления электроэнергии, т. е. от создания генератора тока более экономичного, чем гальванические батареи.

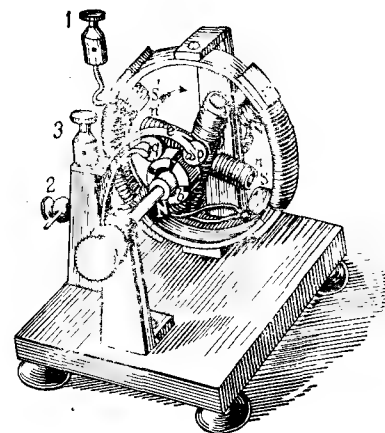


Рис. 4-21. Модель одного элемента электродвигателя Якоби (конструкция 1838 г.).

1, 2—зажимы неподвижной обмотки, 3—зажим коммутационного устройства.

Однако и в тех условиях, когда питание электродвигателей могло осуществляться лишь при помощи гальванических элементов, на практике были случаи, когда выгоднее было устанавливать электродвигатель, чем агрегат для получения механической энергии от парового двигателя. Поэтому в 50-х и 60-х годах в некоторых отраслях производства электродвигатель иногда находил применение. В качестве одного из примеров можно указать типографии. В то время большинство производственных операций в типографиях велось либо ручным способом, либо на машинах с ручным приводом. Появление крупных печатных машин потребовало привода от двигателя. Для одной крупной печатной машины, обычной для типографии того времени, работавшей к тому же периодически, а не в течение целого рабочего дня, проще было использовать электродвигатель. В этих и аналогичных случаях практики за рубежом имел некоторое распространение электродвигатель французского электротехника П. Г. Фромана.

Действие электродвигателя Фромана основывалось на притяжении к неподвижным электромагнитам пластин из мягкой стали, расположенных на двух деревянных колесах, которые укреплялись на вращающейся осн. Общий вид такого электродвигателя представлен на рис. 4-22 (два верхних электромагнита для большей ясности рисунка удалены). Посредством зубчатого коммутатора электрический ток подводился поочередно к двум противоположно размещенным электромагнитам, притягивавшим пару соответствующим образом расположенных пластин. В результате такого притяжения, происходящего всегда в одном и том же направлении и притом только тогда, когда стальные пластины нахо-

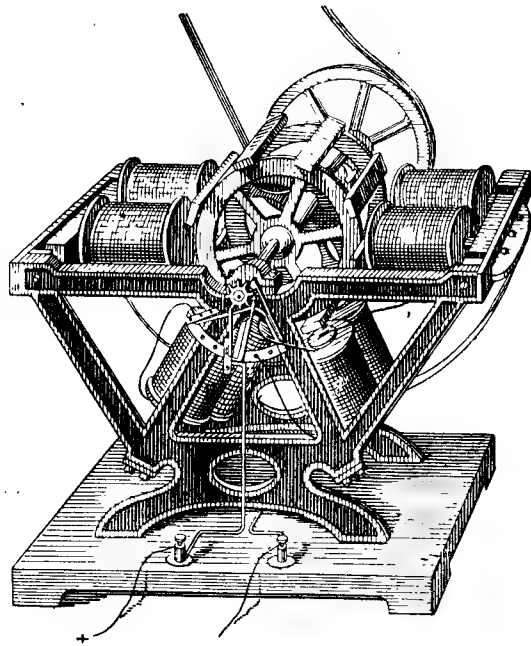


Рис. 4-22. Общий вид электродвигателя Фромана.

дятся близко от сердечника соответствующего электромагнита, вал машины приводился во вращение.

Некоторые из электродвигателей, построенных в 40—60-х годах XIX в., действовали на принципе втягивания стального сердечника в соленоид; получавшееся при этом возвратно-поступательное движение преобразовывалось посредством балансира или шатунно-кривошипного механизма во вращательное движение вала, снабженного для равномерности хода маховыми колесами. Таковы, например, электродвигатели Пейджа (рис. 4-23) и Бурбуза (рис. 4-24). Как видно из конструкций

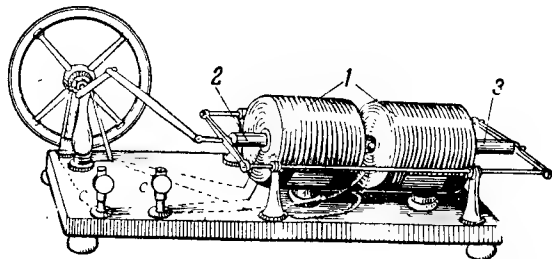


Рис. 4-23. Электродвигатель Пейджа.

1—катушка электромагнитов с втягивающимися сердечниками 2—3.

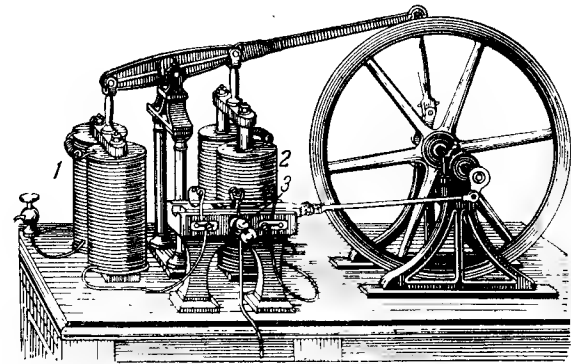


Рис. 4-24. Электродвигатель Бурбуза.

1 и 2—катушки электромагнитов со втягивающимися сердечниками; 3—переключатель.

этих электродвигателей, мысль их изобретателей находилась в плену кинематических особенностей работы паровых машин, в которых возвратно-поступательное движение одного органа (шток поршня) преобразовывалось во вращательное движение вала посредством балансира, кривошипно-шатунного механизма и т. п.

Все рассмотренные выше электродвигатели действовали на принципе взаимных притяжений и отталкиваний магнитов или электромагнитов. Они были снабжены якорями простейшей формы в виде стержня с обмоткой; такие стержневые якоря являются явнополюсными. Этим электродвигателям были свойственны существенные недостатки. Наиболее серьезными из них являлись большие габариты машины при сравнительно малой мощности, большое магнитное рассеяние и низкий к. п. д. Кроме того, вращающий момент на валу таких электродвигателей отличался непостоянством и в связи с попеременными притяжениями и отталкиваниями стержневых якорей действие таких электродвигателей было в большей или меньшей степени толчкообразным. При столь резких и частых изменениях вращающего момента на валу двигателя применение последнего в системе электропривода представлялось малоперспективным.

Третий этап в развитии электродвигателей характеризовался разработкой конструкций электродвигателей с кольцевым неявнополюсным якорем и практически постоянным вращающим моментом. Первый шаг в этом принципиально новом направлении был сделан итальянским ученым,

впоследствии профессором физики Болонского и Пизанского университетов Антонио Пачинотти.

Электродвигатель Пачинотти (1860 г.) состоял из якоря кольцеобразной формы, вращавшегося в магнитном поле электромагнитов (рис. 4-25). Якорь, имеющий форму стального кольца с зубцами (наличие зубцов уменьшало магнитное сопротивление и облегчало крепление обмотки) и ла-

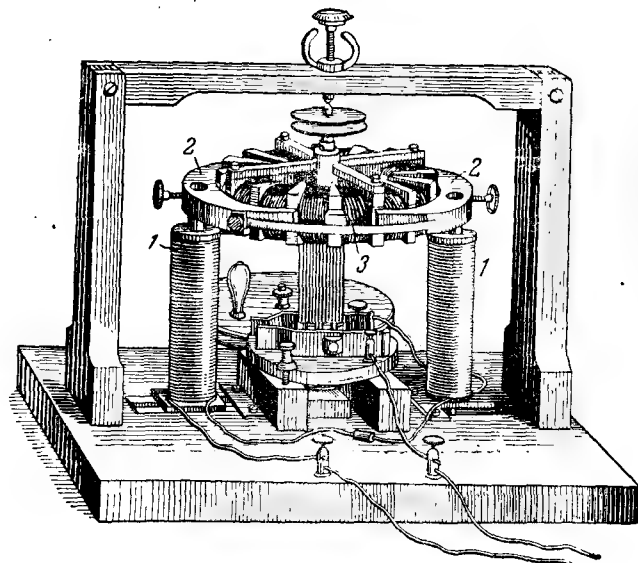


Рис. 4-25. Модель электродвигателя Пачинотти.

1—электромагниты с полюсными наконечниками 2; 3—кольцевой зубчатый якорь с катушками.

тунными спицами, укреплялся на вертикальном валу. На кольцо между зубцами якоря наматывались катушки, концы которых подводились к пластинам коллектора, расположенного на нижней части вала. Подвод тока к пластинам коллектора осуществлялся роликами.

Обмотка электромагнитов, снабженных полюсными наконечниками, включалась последовательно с обмоткой якоря, т. е., согласно современной терминологии, машина имела последовательное возбуждение.

В электродвигателе Пачинотти получался практически постоянный по величине вращающий момент; габариты этого электродвигателя были невелики по сравнению с размерами других электродвигателей равной мощности. Ос-

новное значение работы Пачинотти состоит в том, что им был сделан дальнейший и притом весьма важный шаг на пути построения современной машины постоянного тока: явнополюсный якорь был заменен неявнополюсным. К этому следует еще добавить удобную схему возбуждения и коллектор, по существу говоря, современного типа. Любопытно также отметить, что Пачинотти указал на возможность обращения своего двигателя в генератор. Однако, не зная о возможности применения самовозбуждения машины, он рекомендовал для использования машины в качестве генератора заменить электромагниты постоянными магнитами.

В 1863 г. Пачинотти опубликовал сведения о конструкции своего электродвигателя, но на эту публикацию не было обращено достаточно внимания, и изобретение было на время забыто. Несмотря на большой интерес с принципиальной точки зрения, оно не получило распространения, так как по-прежнему не было еще экономичного генератора электрической энергии. Идея кольцевого якоря была возрождена примерно через 10 лет. З. Т. Граммом в конструкции электромашинного генератора.

Основные этапы
развития
электромашинных
генераторов
постоянного тока

Из рассмотрения истории электродвигателя видно, что его развитие опережало на начальных этапах развитие генератора. Отсутствие хорошего, экономичного генератора электрического тока тормозило расширение практических применений электричества. Примерно до 1870 г. наиболее распространенными источниками тока были электрохимические, т. е. гальванические элементы и аккумуляторы. В дальнейшем преобладающим типом источников электрического тока стали электромашинные генераторы.

Простейшими гальваническими элементами были элементы с одной жидкостью; к числу таких элементов принадлежали вольтов столб и его видоизменения — чашечный элемент Вольты и др. Всем таким генераторам тока были свойственны недостатки, усложнявшие их применение, а следовательно, и внедрение практических электротехнических устройств на базе таких генераторов. К числу наиболее существенных недостатков следует отнести: сравнительно быстрое ослабление действия батарей, вызывавшееся, как позднее было установлено, гальванической поляризацией, малая энергоемкость, а также неудобство эксплуатации и непригодность батарей для транспортировки. В большинстве гальванических элементов в качестве отрицательного электрода применялся цинк, большой расход которого определял дороговизну генерируемой энергии. Если цинк был недостаточно чистым и содержал примеси (свинец, железо и др.), то при погружении его в раствор серной кислоты возникали местные токи. Это приводило

16 История энергетической техники.

к тому, что даже при разомкнутой внешней цепи цинк взаимодействовал с кислотой и растворялся. Пока не были построены принципиально новые генераторы электрического тока, нужно было искать возможности каким-либо путем устранить хотя бы некоторые из перечисленных недостатков.

Исследования процессов в гальванических элементах привели к открытию явления гальванической поляризации (А. С. Беккерель, 1826 г.), которое объяснялось скоплением пузырьков водорода у медного электрода. Поляризация электродов оказывает сильное влияние на постоянство действия элемента. Для устранения поляризации были испробованы различные средства: механическое удаление с медного электрода газа по мере его образования, придание электроду шероховатой поверхности, чтобы пузырькам водорода труднее было приставать, и т. п. Однако действительно практическое решение было достигнуто поглощением водорода в результате химической реакции, возникшей в элементе при участии второй жидкости, служащей деполаризатором.

В 1829 г. Беккерель дал принципиальную конструкцию гальванического элемента с двумя жидкостями: сосуд разделялся пористой перегородкой (например, из слабо обожженной глины) на две части, каждая из которых вмещала одну из жидкостей и один электрод. В первых образцах нового гальванического элемента применялись две жидкости: азотная кислота и раствор поташа, а один из электродов изготовлялся из платины. Позднее Беккерель построил более дешевый элемент, в котором в одну половину сосуда был налит раствор поваренной соли и погружен цинковый электрод, а в другую половину сосуда, отделенную пористой перегородкой, — раствор медного купороса, в который погружался медный электрод. С этого времени (1829 г.) гальванические элементы с одной жидкостью почти выходят из употребления. В короткий промежуток времени появился ряд усовершенствованных конструкций гальванических элементов с двумя жидкостями. Для придания цинковому электроду большей устойчивости и устранения вредного действия примесей, могущих содержаться в цинке, было введено амальгамирование поверхности цинкового электрода.

Другим направлением в области создания электрохимических источников тока было построение электрических аккумуляторов, или «вторичных элементов», как они долгое время назывались.

Принципиальная возможность аккумулярования электрической энергии была установлена еще в начале XIX в., но только в 1854 г. немецкий врач В. И. Зинстеден открыл способ аккумулярования больших количеств электрической энергии, наблюдая явление поляризации, отличное от обычной гальванической поляризации. Это явление заключалось в том, что при пропускании тока через свинцовые электроды, погруженные в разведенную серную кислоту, положительный электрод покрывался двуокисью свинца PbO_2 . При замыкании электродов такого элемента накоротко получался сильный ток в течение более продолжительного времени, чем действовал обычный ток поляризации; такое явление в цепи наблюдалось до тех пор, пока вся двуокись свинца не израсходовалась.

В 1859 г. француз Гастон Планте, по-видимому независимо от Зинстедена, наблюдал то же явление и на его основе построил свинцовый аккумулятор. Очень скоро было установлено, что чем более пористыми будут свинец на одном электроде и двуокись свинца на другом, тем больший запас электрической энергии будет содержать аккумулятор. Эта пористость достигалась с течением времени продолжительным повторением зарядки и разряда аккумулятора; только примерно после

500 ч работы аккумулятора происходило достаточное формирование его пластин. Искусственное формирование аккумуляторных пластин было введено в практику в 80-х годах, и это способствовало значительному улучшению действия аккумуляторов.

Несмотря на то, что электрохимические источники получили до 70-х годов прошлого века значительное развитие и распространение, проблема экономичного источника электрической энергии была решена только созданием совершенной конструкции электромашинного генератора.

Развитие электрических машин наглядно иллюстрирует характерную закономерность в развитии техники вообще. Эта закономерность проявляется в следующем: если развитие какой-либо отрасли техники тормозится недостаточным уровнем развития другой отрасли техники или области науки, то развитие последних ускоряется требованиями первой. Так, если отсутствие экономичного генератора тока сдерживало расширение практических применений электричества, то последние стимулировали, ускоряли развитие генератора.

В развитии электрического генератора, так же как и в развитии электродвигателя, можно наметить три основных этапа.

Первый этап (1831—1851 гг.) характеризуется созданием электрических генераторов с возбуждением от постоянных магнитов; такие генераторы получили в то время название магнитоэлектрических машин.

Открытие в 1831 г. явления электромагнитной индукции указало новый способ получения электрического тока, который нашел свое практическое воплощение в первом униполярном генераторе — диске Фарадея. Одно из наиболее ранних и весьма интересное конструктивное решение генератора с возбуждением от постоянных магнитов было дано в середине 1832 г. анонимным изобретателем, скрывшим свое имя под латинскими буквами Р. М. Его машина была первым однофазным синхронным многополюсным генератором. В первом варианте генератора Р. М. железные сердечники катушек не имели замыкающего магнитопровода. На рис. 4-26 представлен второй вариант генератора Р. М., в который изобретатель внес существенное улучшение: он ввел добавочное стальное кольцо, замкнувшее магнитную цепь сердечников, и поместил на кольцо в промежутке между основными катушками добавочные обмотки, соединенные последовательно с обмотками катушек.

С помощью этого генератора удалось разложить воду (поскольку ток был переменным, то при электролизе воды получился гремучий газ). Переменный ток в то время не мог еще найти себе потребителя, так как для всех практических применений электричества (минная электротехника, только что зародившаяся электромагнитная телеграфия, первые электродвигатели) требовался постоянный ток. По-

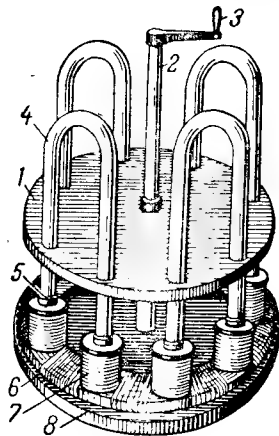


Рис. 4-26. Генератор Р. М. (II вариант).

1 — деревянный диск, укрепленный на оси 2, приводимой в движение посредством рукоятки 3; 4 — подвижные постоянные магниты; 5 — железные сердечники катушек; 6 — стальное кольцо с добавочными обмотками, замыкающее магнитную цепь сердечников; 8 — подставка.

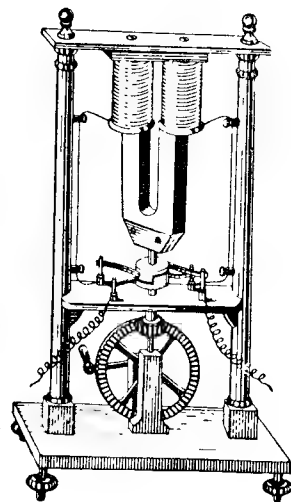


Рис. 4-27. Генератор с барабанным коммутатором бр. Пиксии.

этому в последующем изобретатели направили свои усилия на построение генераторов, дающих электрический ток постоянного направления, разрабатывая для этих целей разнообразные коммутационные устройства.

Впервые приспособление для выпрямления тока в переменнo-полюсной машине (в отличие от униполярной машины Фарадея, которая не нуждалась в устройстве для выпрямления тока, так как давала непосредственно постоянный ток) было применено в сентябре 1832 г. в генераторе братьев Пиксии (рис. 4-27). При вращении подковообразного постоянного магнита наводилась переменная э. д. с. в двух неподвижных катушках со стальными сердечниками. Магнит приводился во вращение посредством рукоятки и конической передачи; концы последовательно

соединенных катушек выводились к зажимам барабанного коммутатора. В некоторых генераторах для получения тока неизменного направления (но резко пульсирующего

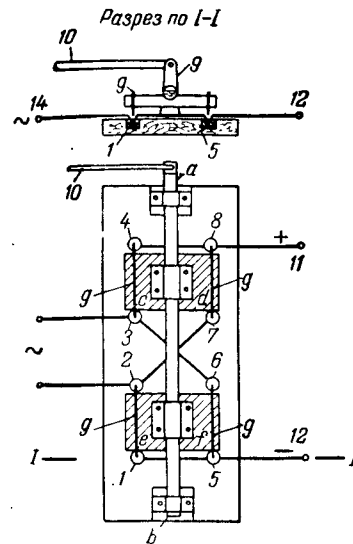


Рис. 4-28. Коромысло Ампера.

На качающемся валу *ab*, связанном кинематически через рычаги 9 и 10 с валом генератора, укреплены деревянные пластинки *dc* и *ef* с металлическими дужками *g*. При качании вала концы дужек поочередно опускаются в чашечки со ртутью 1—8, которые электрически соединены, как показано на чертеже. Если к чашечкам 2 и 3 подводится переменный ток, то на зажимах 11 и 12 получается выпрямленный ток.

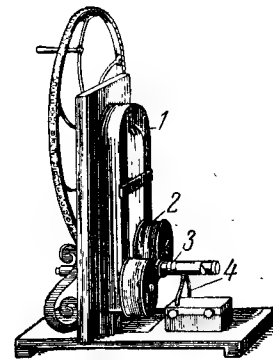


Рис. 4-29. Генератор Кларка.

1 — постоянный магнит; 2 — подвижные катушки; 3 — пластины коммутатора (полудиски) с контактными пружинами 4.

по величине) применялось так называемое коромысло Ампера (рис. 4-28).

Недостатком машин Р. М. и Пиксии являлось то, что в них приходилось вращать более или менее тяжелые постоянные магниты. Целесообразнее оказалось сделать магниты неподвижными, а заставить вращаться более легкие катушки; при этом проще было выполнить и коммутирующее устройство, вращающаяся часть которого была закреплена на валу вместе с якорем. Магнитоэлектрические генераторы такого типа оказались значительно более удобными и именно в такой конструктивной форме впервые вошли в практику.

Одним из ранних генераторов этого типа была машина, построенная лондонским механиком Л. Кларком (1835 г., рис. 4-29). При вращении катушек в поле постоянного магнита в них наводилась э. д. с. На валу имелось специальное коммутирующее устройство в виде двух полу-

цилиндров, которое представляло собой простейший двух-пластинчатый коллектор.

Более совершенным с точки зрения увеличения потока сцепления, но в принципе мало отличавшимся от машины Кларка был магнитоэлектрический генератор Б. С. Якоби. Занимаясь усовершенствованием методов электрического взрывания мин, Б. С. Якоби построил в 1842 г. генератор, названный им «магнитоэлектрической батареей» (рис. 4-30). Этот генератор был принят на вооружение гальванических команд русской армии, использовавших его для воспламенения минных запалов.

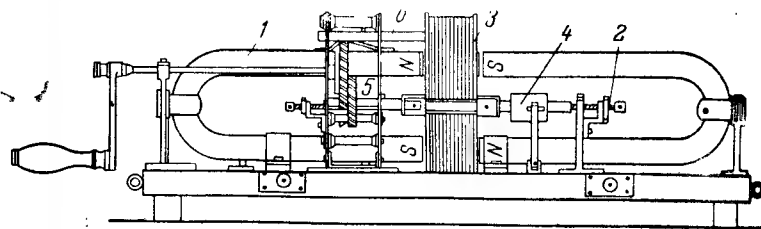


Рис. 4-30. Магнитоэлектрический генератор Якоби.

1—постоянные магниты; 2—ось с укрепленными на ней катушками; 3; 4—двух-пластинчатый коммутатор; 5—зубчатая передача; 6—стопор.

Стремление повысить мощность магнитоэлектрических генераторов привело со временем к увеличению числа постоянных магнитов. Этот путь отражал уже знакомую из истории развития электродвигателей тенденцию: для получения значительной мощности соединять несколько элементарных машин в одну. Наибольшее распространение в лабораторной практике 40-х и 50-х годов прошлого века получил магнитоэлектрический генератор немецкого электротехника Э. Штерера (1843 г., рис. 4-31). Установка трех магнитов несколько увеличила мощность машины, но не сделала ее пригодной для широких практических целей. При помощи генератора Штерера многими учеными, в том числе Э. Х. Ленцем и Б. С. Якоби, было проведено исследование процессов в магнитоэлектрической машине.

Известный толчок построению более мощных магнитоэлектрических генераторов дали дуговые лампы с регуляторами. Однако в большинстве случаев дуговые лампы не могли получить распространения не столько из-за несовершенства их конструкции, сколько по причине отсутствия надежного и экономичного генератора электриче-

ской энергии. Можно отметить, что в осветительных устройствах 50-х годов (установки Аршро в С. Петербурге — 1849 — 1850 гг., проф. А. С. Савельева в Казани —

1851 г., А. И. Шпаковского в Москве — 1856 г., проф. В. И. Лапшина в Харькове — 1859 г. и др.) генерирующее устройство состояло из большого числа (600—1 000) гальванических элементов.

Развитие торгового флота после промышленного переворота и все более расширявшееся при-

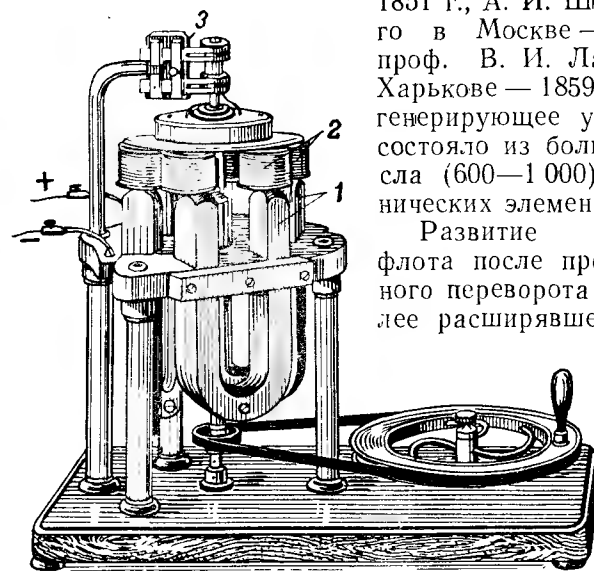


Рис. 4-31. Генератор Штерера.

1—неподвижные постоянные магниты; 2—подвижные катушки; 3—коммутатор.

менение парового двигателя на морских судах требовали улучшения морской сигнализации. Необходимо было обеспечить мощными маяками побережья, а также наиболее важные или опасные участки морских путей. Появление нового источника света, так называемого известкового или друммондова, создавало возможность увеличить дальность действия маяков; но для питания горелок друммондова света нужны были кислород и водород или их соединение (гремучий газ). Только при обеспечении горелок друммондова света кислородом и водородом можно было использовать все преимущества этого интенсивного источника света. Еще в 1849 г. профессор физики Брюссельской военной школы Нолле принялся за построение большого магнитоэлектрического генератора, с тем чтобы с его помощью осуществить в значительных масштабах электролиз воды для получе-

ния кислорода и водорода. Он исходил из конструкции обычных в то время генераторов, но отказался от увеличения размеров магнита или скорости вращения катушек, а пошел по проторенному пути комбинирования в одном агрегате большого числа отдельных машин. Работа Нолле была продолжена после его смерти Ван Мальдереном (Франция) и Хольмсом (Англия). К 1856 г.

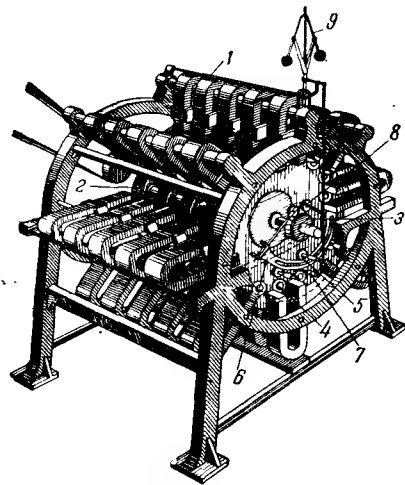


Рис. 4-32. Общий вид генератора «Альянс».

1—ряды неподвижных постоянных магнитов; 2—несущие колеса с катушками-якорями; 3—коллектор; 4—5—7—устройство для смещения роликовых токоприемников 8 с нейтралей; 9—центробежный регулятор.

конструкция машины была разработана, а в Париже была организована электропромышленная компания «Альянс» для производства таких машин; по названию фирмы получил свое наименование и новый генератор.

В магнитоэлектрическом генераторе «Альянс» чугунная станина несла на себе неподвижно укрепленные в несколько рядов подковообразные постоянные магниты, расположенные равномерно по окружности и радиально по отношению к валу. В промежутках между рядами магнитов на валу были установлены несущие колеса с большим числом катушек-якорей. В изображенной на

рис. 4-32 машине число рядов постоянных магнитов 5, число несущих колес 4, а число катушек на каждом несущем колесе 16; таким образом, в машине было 40 магнитов и 64 стержня (явнополюсных якоря). Различные варианты машины «Альянс» имели разное число рядов магнитов (3, 5, 7). На валу генератора был укреплен коллектор с 16 металлическими пластинами, изолированными друг от друга и от вала машины. Ток, наводимый в катушках при вращении вала, снимался с коллектора при помощи роликов. В машине впервые было предусмотрено устройство для смещения роликов в зависимости от нагрузки; перемещение роликов происходило под действием тя-

иущих от центробежного регулятора, который был связан с валом машины.

В генераторе «Альянс» можно было варьировать соединение обмоток катушек, в результате чего менялась э. д. с. в цепи. Вследствие этого генератор мог давать большой ток низкого напряжения и служить, например, для целей гальванопластики и электролиза либо ток меньшей силы, но более высокого напряжения (40—250 в) для питания дуговых ламп.

Магнитоэлектрические генераторы «Альянс» были установлены при многих маяках с дуговыми лампами, например на мысах Эв и Грине (во Франции), в Саут-Форленде в Англии. В течение 1857—1865 гг. в эксплуатации было около 100 машин «Альянс». Одна такая машина требовала для своего привода парового двигателя мощностью 6—10 л. с. Вес шестидисковой машины «Альянс» доходил до 4 т, причем только одни магниты весили более 1 т.

Генератор «Альянс» нагляднее, чем другие, меньшие по размерам машины, показал недостатки, присущие вообще магнитоэлектрическим машинам. Под действием реакции якоря в результате естественного старения и возможных вибраций постоянные магниты быстро размагничивались, в связи с чем э. д. с. генератора уменьшалась и его мощность снижалась. Во всех этих машинах применялись стержневые якоря, имевшие многослойную обмотку; якоря при работе быстро и сильно нагревались вследствие плохого отвода от них тепла, что приводило к быстрому разрушению изоляции. Вес и габариты магнитоэлектрических генераторов, несмотря на их небольшую мощность, были весьма значительными, и крупные машины были сравнительно дорогими. Принципиальным недостатком машин с явнополюсными якорями являлось то, что они давали ток, неизменный по направлению, но резко пульсирующий по величине.

Увеличение мощности магнитоэлектрических машин могло быть лишь отчасти достигнуто путем увеличения размеров и числа постоянных магнитов и соответствующим увеличением числа или размеров катушек; мощные магнитоэлектрические машины, как показывает пример генератора «Альянс», могли конструироваться лишь как сочетания в одном агрегате большого числа простых машин.

Исследования в области электромагнетизма показали, что при помощи электромагнита можно получить значи-

тельно большие величины магнитной индукции в магнитной цепи электрической машины, чем при помощи постоянных магнитов. Следовательно, генератор с электромагнитами при прочих равных условиях мог дать большую вели-

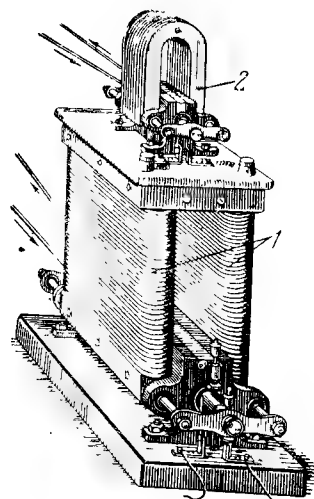


Рис. 4-33. Генератор Уайльда.
1—П-образный электромагнит;
2—возбудитель.

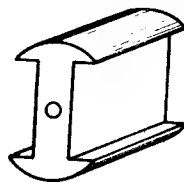


Рис. 4-34. Сердечник двух-Т-образного якоря.

чину э. д. с. и большую мощность.

Так начался *второй этап* развития электрического генератора (1851—1867 гг.), занявший сравнительно небольшой отрезок времени. Он характеризуется преобладанием генераторов с независимым возбуждением.

Первое предложение заменить постоянные магниты электромагнитами, возбуждаемыми током от магнитоэлектрической машины, было сделано в 1851 г. В. И. Зинстеденом.

В качестве характерного примера генератора с электромагнитами, обмотки которых питались токами от независимого источника, может быть указан генератор англичанина Г. Уайльда (1863 г.). Этот генератор (рис. 4-33) имел П-образный электромагнит, для питания которого был приспособлен отдельный возбудитель — небольшой магнитоэлектрический генератор (в данной конструкции расположен наверху).

Вместо обычно применявшегося стержневого якоря Уайльд использовал предложенный в 1856 г. В. Сименсом якорь с сердечником двутаврового сечения (так называемый «двух-Т-образный» якорь), который является разновидностью явнополюсного якоря (см. рис. 3-34). Этот якорь имел форму вала с продольными выточками, в которые

укладывалась обмотка. Машина с двух-Т-образным якорем обладала меньшим магнитным рассеянием, чем со стержневым, но в то же время этот якорь, как и стержневой, имея многослойную обмотку с плохим теплоотводом, сильно грелся при работе и тем самым ограничивал мощность установки. Машина Уайльда подготовила конструкторскую мысль к созданию генераторов с самовозбуждением. Действительно, более естественным было питать обмотку возбуждения генератора Уайльда не током от отдельного источника, а током самой этой машины, соединив, например, последовательно обмотку возбуждения с обмоткой якоря. После 1867 г., с открытием принципа самовозбуждения, в развитии электрического генератора начался третий этап.

Принцип самовозбуждения получил широкую известность только после 1867 г., когда почти одновременно в разных странах были построены генераторы с самовозбуждением. Однако впервые этот принцип был открыт еще в начале 50 годов датским изобретателем С. Хиортом, который, пытаясь применить электродвигатель на железнодорожном транспорте, занимался разработкой различных конструкций электрических машин. В 1852 г. Хиорт пришел к идее самовозбуждения, а в 1854 г. он взял английский патент на машину с самовозбуждением. В этом патенте он достаточно точно и ясно описывает принцип самовозбуждения, но, опасаясь, что остаточного магнетизма не будет хватать для начального импульса, Хиорт наряду с электромагнитами применил и постоянные магниты. Следовательно, эта первая машина с самовозбуждением имела фактически комбинированное возбуждение и являлась как бы промежуточным типом между машинами магнитоэлектрическими и машинами с самовозбуждением. Следует отметить, что в других своих работах Хиорт указывает, что можно вполне обойтись без постоянных магнитов, обеспечивая начальный импульс остаточным магнетизмом сердечников электромагнитов.

В 1856 г. венгерский физик Аньош Йедлик независимо от Хиорта пришел к выводу о том, что если обмотки возбуждения присоединить к зажимам якоря того же генератора, то при пуске машины развивается процесс самоусиления магнитного поля. Вместе с тем Йедлик заметил, что для того чтобы этот процесс начался, нет необходимости устанавливать в машине постоянные магниты, как это делал Хиорт, а вполне достаточно для этого остаточного маг-

нетизма. Так, Йедлик совершенно сознательно сформулировал не только принцип самоусиления магнитного поля, но и принцип самовозбуждения генератора. В 1861 г. он построил самовозбуждающийся генератор.

Работы Хиорта и Йедлика были несколько преждевременными, и, кроме того, изобретатели не располагали необходимыми средствами для промышленного изготовления машин в больших масштабах. На их идеи не было обращено достаточного внимания. В 1866 г. английские инженеры Кромвель и Сэмьюэл Варли, а в начале 1867 г. Вернер Сименс и английский физик Чарлз Уитстон выступили с описанием принципа самовозбуждения, который фактически был уже предложен ранее. Почти одновременная разработка принципа самовозбуждения в разных странах наглядно иллюстрирует одну из характерных закономерностей в развитии техники.

Существенным недостатком первых генераторов с самовозбуждением являлась весьма несовершенная конструкция якоря. Так, двух-Т-образный якорь не только ограничивал мощность машины из-за быстрого нагрева, но давал резко пульсирующий ток. В последнем отношении двух-Т-образный якорь ничем не отличался от стержневого, поскольку и тот и другой были только разновидностями неудачного явнополюсного исполнения якорей машин постоянного тока.

Событием, революционизировавшим развитие электрической машины, положившим начало промышленной электротехнике, явилось объединение принципа самовозбуждения с конструкцией кольцевого якоря.

Разработка самовозбуждающихся генераторов с кольцевым и барабанным якорями и развитыми магнитными системами составила основное содержание *третьего этапа* в развитии электрических генераторов.

Первый патент на самовозбуждающийся генератор с кольцевым якорем был получен З. Граммом в 1870 г. Как уже отмечалось, кольцевой якорь был изобретен Пачинотти в 1860 г. Грамм в своем патенте указывал, что сердечник якоря может изготавливаться из пучка стальных проволок (рис. 4-35), благодаря чему должны заметно снизиться потери на вихревые токи; кроме того, Грамм предусмотрел возможность построения многополюсных машин. Вместе с тем Грамм сделал шаг назад по сравнению с работами Пачинотти, изготовив свой якорь без зубцов, что вело, с одной стороны, к усложнению крепления обмотки,

а с другой — к увеличению магнитного сопротивления воздушного зазора в машине и некоторому увеличению потерь в меди якоря. Грамм применил кольцевой якорь сначала для магнитоэлектрических генераторов, а затем снабдил кольцевым якорем машину с самовозбуждением, что и явилось громадным шагом вперед.

На рис. 4-36 изображен один из первых магнитоэлектрических генераторов Грамма с ручным приводом. В этой конструкции применен кольцевой якорь и по сути дела современного типа коллектор. Одним из важнейших преимуществ кольцевого якоря являлось то, что он давал по-

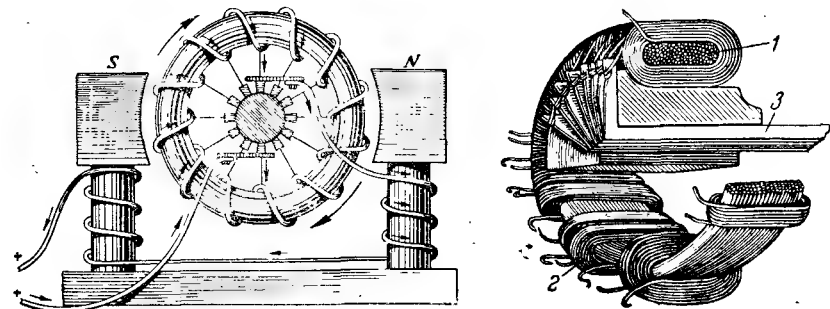


Рис. 4-35. Самовозбуждающийся генератор Грамма.
Слева — схема соединения обмотки якоря с обмоткой возбуждения, справа — детали «кольца Грамма».
1 — сердечник кольца из стальных проволок; 2 — секции обмотки; 3 — коллекторная пластина.

стоянный ток, практически неизменный по величине. Такой ток полностью отвечал тем требованиям, которые предъявлялись условиями возбуждения генератора. В противоположность этому в ранних конструкциях генераторов с самовозбуждением, в которых использовался, например, двух-Т-образный якорь, ток был резко пульсирующим и вызывал большие потери в полюсах машины от изменения намагничивания. С этой точки зрения мысль Грамма использовать постоянный ток, получаемый от машины с кольцевым якорем, для возбуждения той же машины была чрезвычайно плодотворной.

На рис. 4-37 изображен самовозбуждающийся генератор Грамма с кольцевым якорем. На горизонтальном валу укреплен якорь, охватываемый сверху и снизу полюсными наконечниками. Магнитный поток создается электромагнитами; на специальных щеткодержателях укреплены щет-

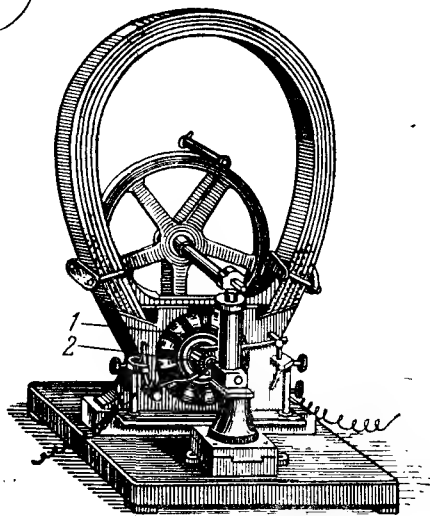


Рис. 4-36. Магнитоэлектрический генератор Грамма с ручным приводом.
1 — кольцевой якорь; 2 — коллектор.

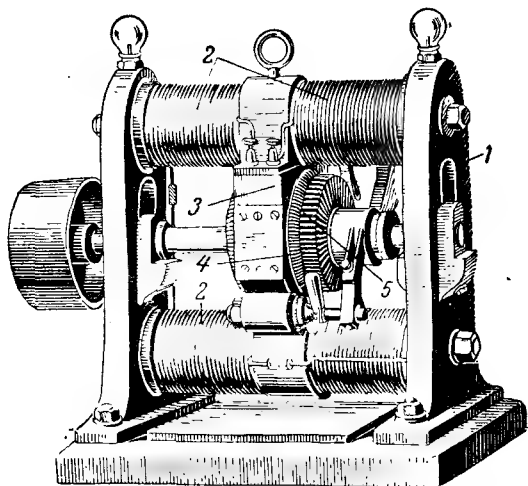


Рис. 4-37. Самовозбуждающийся генератор Грамма для питания осветительных установок.
1 — чугунная станина; 2 — электромагниты; 3 — полюсные наконечники; 4 — кольцевой якорь; 5 — коллекторные пластины.

ки. Якорь приводится во вращение через приводной шкив. Обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря. Конструкция машины, конечно, не выдерживает критики с точки зрения конфигурации магнитопровода, но усовершенствования этого рода могли последовать только в 80-х годах, после того как были разработаны методы расчета магнитной цепи. Позднее Грамм предложил еще несколько конструкций самовозбуждающихся машин, различных по внешнему виду и по мощности, но принципиальных изменений в свою машину он больше не вносил.

Генератор Грамма оказался весьма экономичным источником электрической энергии, позволявшим получать значительные мощности при высоком к. п. д. и сравнительно малых габаритах и весе. Сравнение машины Грамма, например, с машиной «Альянс» показывает, что самовозбуждающийся генератор с кольцевым якорем имеет вес на 1 кВт примерно в 6 раз меньший, чем генератор с постоянными магнитами.

Очевидные преимущества генератора Грамма способствовали тому, что этот генератор быстро вытеснил другие типы и получил очень широкое распространение. В начале 70-х годов принцип обратимости электрических машин был уже хорошо известен, и машина Грамма использовалась как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Таким образом, в начале 70-х годов обе линии развития электрических машин — генератора и двигателя — объединились.

Машина Грамма представляла собой машину постоянного тока современного типа. Однако она нуждалась в определенных усовершенствованиях, и эти усовершенствования последовали в 70—80-х годах прошлого века.

Одно из наиболее существенных улучшений заключалось в замене кольцевого якоря барабанным и было осуществлено в 1873 г. немецким электротехником Ф. Гефнер-Альтенеком. Основным недостатком кольцевого якоря являлось плохое использование меди в его обмотке, так как части витков обмотки, находившиеся на внутренней поверхности кольца, не использовались вовсе. В барабанном же якорю обе стороны каждой секции участвовали в создании э. д. с., а не работали только лобовые части обмотки. С 1878 г. барабанный якорь стали делать зубчатым, что позволило более надежно крепить обмотки и уменьшить воздушный зазор в машине. Борьба за снижение потерь в теле якоря привела в 1880 г. Т. А. Эдисона к мысли

изготавливать якорь шихтованным, т. е. набранным из тонких стальных листов, оклеенных бумагой (впоследствии оклейка стальных листов бумагой была заменена лакировкой этих листов). В том же 1880 г. для улучшения условий охлаждения якоря американский изобретатель Х. Максимум предложил разделять шихтованный якорь на пакеты; это давало возможность образовать в теле якоря каналы для прохождения воздуха. С 1885 г. началось применение шаблонной обмотки, что значительно улучшило ее качество и снизило стоимость машин. Важным усовершенствованием машины постоянного тока явилось введение в 1884 г. компенсационной обмотки, а в 1885 г. — дополнительных полюсов, с помощью которых удавалось компенсировать реакцию якоря и улучшить коммутацию. В 1891 г. Э. Арнольд опубликована первая работа, посвященная теории и конструированию обмоток электрических машин.

Так в течение 70—80-х годов машина постоянного тока приобрела все основные черты современной машины. Дальнейшие усовершенствования не затрагивали основных принципов и конструктивных узлов машины и были направлены на повышение качества, улучшение использования активных материалов и усовершенствование изоляции, на повышение качества щеток и пр.

Начало исследований процессов в электрических машинах

В начальный период конструирования электромашинных генераторов уже было известно, что э. д. с. индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур тока; поэтому увеличения э. д. с. в машинах пытались достигнуть путем увеличения скорости якоря. Тщательные измерения показали, что ток, даваемый генератором, при неизменном сопротивлении нагрузки сначала растет почти строго пропорционально скорости машины, а затем линейная зависимость все более заметно нарушается. Это неожиданное обстоятельство пытались объяснить тем, что при быстром изменении магнитного поля сталь не успевает намагнититься (гипотеза В. Вебера).

В 1845 г. изучением этого вопроса занялся Э. Х. Ленц. Исследования, проведенные с машиной Штерера, привели его в 1847 г. к чрезвычайно важным для развития электрических машин выводам. Он показал, что ток нагрузки, протекающий по обмотке якоря, создает магнитный поток, который взаимодействует с основным магнитным потоком. В результате этого основной магнитный поток ослабляется, а нейтральная линия машины сдвигается в сторону вращения якоря. Таким образом, Ленц совершенно правильно описал то явление, которое впоследствии получило название реакции якоря. Следует отметить, что к представлениям о реакции якоря подходил за год до этого и Б. С. Якоби, но исследованием этого явления он не занимался.

Важным практическим результатом исследования Ленцем реакции якоря было его предложение смещать щетки по направлению вращения так, чтобы они были установлены на действительной нейтральной ли-

нии. Говоря современным языком, Ленц впервые предложил смещать щетки с геометрической нейтральной на физическую. В машине «Альянс», как видно из предыдущего, было уже использовано это предложение: токосъемные ролики (щетки) перемещались под действием тяг, идущих от центробежного регулятора, который в свою очередь был связан с валом машины.

В 1840 г. Б. С. Якоби была выполнена одна из первых работ по теории электрических машин, основное содержание которой сводилось к выяснению энергетической сущности процессов. В этой же работе Якоби описал открытое им явление обратной э. д. с.

Существенным вкладом в развитие электрической машины было исследование Зинстеденом сердечников якорей, на основании которого он пришел к выводу о целесообразности замены массивных стержней пучками тонкой стальной проволоки. Это прогрессивное предложение, направленное на уменьшение потерь от вихревых токов, в то время в практике электромашиностроения не привилось, и до 70-х годов продолжали строить машины с массивными сердечниками.

Первый математический анализ работы машины с самовозбуждением дал Дж. К. Максвелл. В работе, опубликованной в 1867 г., Максвелл, между прочим, впервые ввел понятие о постоянной времени в цепях электрической машины.

Исключительно важное значение для развития электромашиностроения имели исследования свойств мягкого железа и разработка методов расчета магнитной цепи. Основополагающие исследования, касающиеся намагничивания мягкого железа, принадлежат профессору Московского университета А. Г. Столетову. В 1871 г. в Московском математическом обществе А. Г. Столетов сообщил о работе, составившей предмет его докторской диссертации, в которой была глубоко исследована зависимость коэффициента восприимчивости¹ от намагниченности железа (этот коэффициент Столетов называл «функцией намагничивания»). Проведя множество чрезвычайно тонких экспериментов с намагничиванием замкнутого железного кольца, Столетов установил, что коэффициент восприимчивости с увеличением намагниченности растет, достигает максимума, а затем убывает. Метод исследования, разработанный Столетовым, положен в основу современных методов изучения магнитных свойств стали.

Практическое значение своих исследований правильно оценил А. Г. Столетов, указав, что знание свойств железа при его намагничивании столь же важно для электромашиностроения, как знание свойств водяного пара для построения паровых машин. Своевременность появления труда Столетова становится очевидной, если вспомнить, что эта работа была опубликована в 1871 г., т. е. спустя всего 1 год после построения первых машин Грамма.

Изучение магнитных свойств железа было продолжено многими учеными в 70—80-х годах. Так, в 1880 г. Э. Варбургом было открыто явление гистерезиса, и начались исследования потерь в железе при перемагничивании (Т. Юинг, Ч. П. Штейнметц). Большое значение для проектирования электрических машин и аппаратов имели работы Дж. Гопкинсона, который в начале 80-х годов сформулировал так называемый закон Ома для магнитной цепи. Гопкинсон впервые предложил при расчете электрической машины или электромагнитного аппарата раз-

¹ Коэффициентом восприимчивости называется коэффициент χ из формулы $I = \chi H$, где I — намагниченность, а H — напряженность намагничивающего поля.

бывать их магнитную цепь на ряд участков, каждый из которых имеет постоянные магнитную проницаемость и сечение, и представил закон Ома для магнитной цепи в виде:

$$\Phi = \frac{\omega i}{\mu_1 s_1 + \mu_2 s_2 + \dots + \mu_n s_n},$$

где Φ — магнитный поток;

ωi — намагничивающая сила („ампер-витки“);

l и s — длина и сечение соответствующего участка магнитной цепи,

μ — магнитная проницаемость.

На базе работ Гопкинсона был разработан метод расчета магнитной цепи, который полностью сохранил свое значение до настоящего времени.

На основании теоретических исследований, выполненных в 70-х годах, удалось перейти от грубой эмпирики к осмысленному, достаточно строгому проектированию электрических машин, аппаратов и приборов. Прежде всего это выразилось в совершенствовании форм магнитопроводов и, следовательно, в уменьшении магнитного рассеяния и снижении потерь. Машина постоянного тока, в частности, к 1890 г. получила такую конфигурацию магнитопровода, которая не отличается от современной.

4.4. НЕЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ИХ РОЛЬ В РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Энергетическими применениями электрической энергии называются такие, при которых затрата энергии в той или иной степени пропорциональна количеству получаемого продукта, величине или интенсивности производимого эффекта. Неэнергетические применения имеют целью использовать электрическую энергию в качестве вспомогательного средства для передачи импульсов, сигналов и т. п. (телеграфия, телефония, электрическое взрывание мин, цепи управления и т. п.).

Первыми практическими применениями электрической энергии были именно неэнергетические; это объясняется прежде всего тем, что такие применения не требуют значительных затрат электрической энергии. Понятно, что до создания экономичных источников электроэнергии энергетические применения не могли получить сколько-нибудь заметного использования.

Расширение неэнергетических применений электричества сыграло значительную роль в развитии электротехники вообще, так как в процессе создания разнообразных устройств такого рода неизбежно приходилось разрешать ряд практических и теоретических проблем в области электротехники: совершенствовать источники тока, создавать

разнообразные приборы и приспособления, в том числе и автоматические, изготавливать изолированные проводники, исследовать свойства различных материалов, разрабатывать методы измерений, устанавливать единицы.

Электрический телеграф явился первым электротехническим устройством, предназначенным для широкого практического использования.

Интенсивное развитие электрических телеграфов в первой половине XIX в. явилось одним из следствий промышленного переворота, когда бурно развивавшееся капиталистическое производство, торговля и мореплавание потребовали создания более совершенных средств связи.

По принципу действия первые электрические телеграфы можно разделить на три типа: электростатические, электролитические и электромагнитные.

Попытки создания электростатического телеграфа, основанного на передаче по проводам электрических зарядов, относятся к концу XVIII—началу XIX вв. Однако опыты показали невозможность создания надежных устройств электростатического телеграфа. Открытие гальванического электричества и изучение его действий, в первую очередь электрохимических, расширили практические возможности телеграфии. Одним из первых телеграфов такого рода был электролитический телеграф С. Т. Земмеринга (1807 г.). Приемная часть этого телеграфа представляла собой большой сосуд с водой, в котором размещались 25 электродов, соединенных проводами с вольтовым столбом, установленным на передающей станции. Посылаемые сигналы распознавались по пузырькам газа, выделявшегося при электролизе воды в сосуде около определенной пары электродов. Несмотря на ряд усовершенствований, сделанных Земмерингом в последующие годы с целью упрощения конструкции, электролитический телеграф оставался достаточно громоздким и, главное, ненадежным устройством.

Значение электролитических и отчасти электростатических телеграфов в истории телеграфии определяется тем, что при их конструировании были успешно разрешены многие конкретные технические задачи: созданы клавишный манипулятор и коммутационные приспособления, использованы два направления тока и обратный провод, улучшена изоляция проводов и др. Все это облегчило разработку электромагнитных телеграфов, в которых проблема телеграфии впервые получила наиболее полное разрешение. Созданием электромагнитных телеграфов было положено начало электрической телеграфии как самостоятельной отрасли техники.

Представляет интерес устройство первого электромагнитного телеграфа (телеграфа Шиллинга), явившегося

исходной конструкцией последующих электромагнитных телеграфов.

Впервые на возможность использования магнитных действий тока для построения электрического телеграфа указал А. М. Ампер в 1820 г., однако потребовалось около 10 лет, чтобы сконструировать первый практически при-

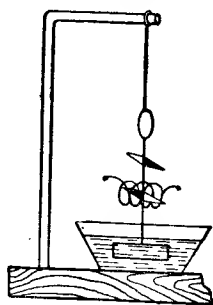
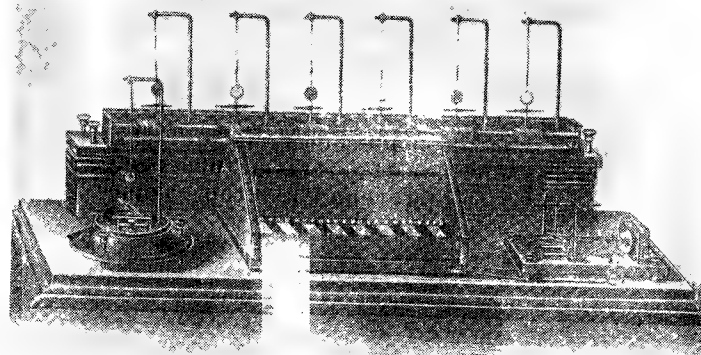


Рис. 4-38. Общий вид приборов телеграфа Шиллинга и схема приемного аппарата телеграфа.

годный электромагнитный телеграф. Такой телеграф был разработан П. Л. Шиллингом в 1828—1832 гг. Этот телеграф был основан на визуальном приеме кодовых знаков. Приемная часть телеграфа представляла собой укрепленную на нити магнитную стрелку, находившуюся внутри рамки, обтекаемой током (рис. 4-38); в зависимости от направления тока в рамке стрелка могла поворачиваться в ту или другую сторону. Вместе со стрелкой поворачивался и небольшой картонный диск, укрепленный на той же нити. Используя два направления тока, общий обратный провод и оригинальный код, составленный из комбинаций

отклонений дисков шести мультипликаторов, Шиллинг смог передавать все буквы алфавита и цифры, ограничившись всего восемью проводами, соединяющими передающую и приемную станции¹.

П. Л. Шиллингом впервые был введен в область электрической передачи кодированный сигнал, чем было положено начало кодоимпульсному методу, который широко применяется в современной телемеханике. Заслуживает

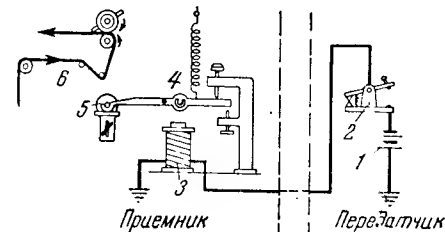


Рис. 4-39. Схема телеграфа Морзе.

1—батарея; 2—ключ; 3—электромагнит приемной станции; 4—якорь электромагнита; 5—пишущее колесо, смоченное краской; 6—движущаяся лента.

также внимания использование в данной конструкции телеграфа специального жидкостного демфера, нашедшего позднее применение в различных электрических приборах.

В процессе разработки проекта подводной телеграфной линии Петергоф—Кронштадт (1837 г.) Шиллингом был впервые применен каучук для изолирования подводного кабеля, а также указана возможность использования воды или земли в качестве обратного провода.

Из всех предложенных после Шиллинга конструкций телеграфных аппаратов наиболее широкое применение получил телеграф С. Морзе (рис. 4-39), первая линия которого была построена в 1844 г. между Вашингтоном и Балтиморой. Распространение этого телеграфа объясняется

¹ Здесь имеется в виду шестистрелочный (шестимultiпликаторный) (о мультипликаторе см. стр. 270) телеграф Шиллинга. Этот телеграф отличался от предложенного им вначале одномultiпликаторного телеграфа, требовавшего прокладки всего двух проводов. В одномultiпликаторном телеграфе буква или цифра передавалась посредством одного или нескольких сигналов, последовательно посылавшихся по одной и той же паре проводов. Следовательно, азбука Шиллинга явилась первым телеграфным кодом в современном смысле слова. Шестимultiпликаторный телеграф был создан с целью упрощения передачи и расшифровки знаков.

сравнительной простотой телеграфной азбуки, состоявшей из комбинации точек и тире.

Заслуживает внимания разработанный Б. С. Якоби принцип электрической синхронно-синфазной связи, являющийся одним из фундаментальных принципов современной техники дистанционной передачи и следящего элек-

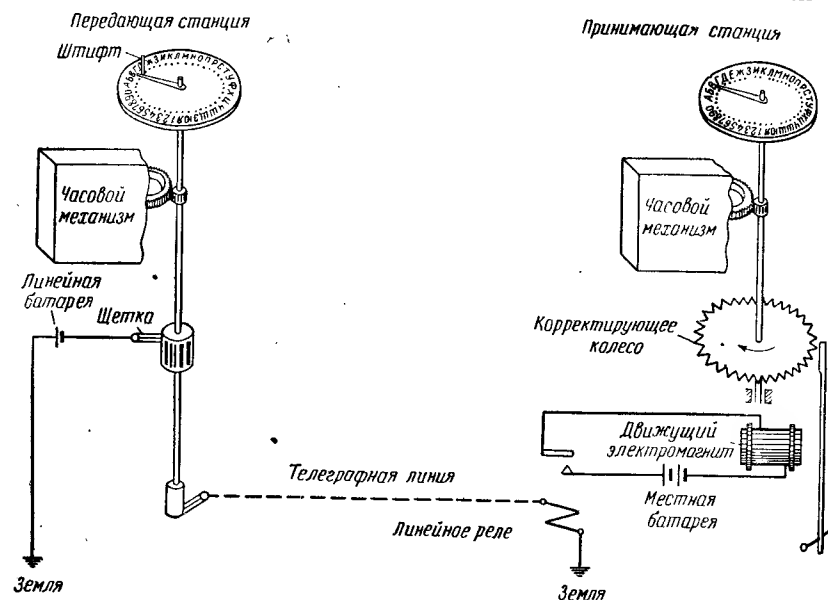


Рис. 4-40. Принцип действия стрелочного телеграфа Якоби с синхронно-синфазной связью.

При движении стрелки передатчика от буквы к букве коллектор каждый раз прерывает линейный ток. Движущий электромагнит приемника при этом отпускает свой якорь, позволяя корректирующему колесу повернуться на один зубец и стрелке продвинуться к следующей букве циферблата. Остановка штифтом стрелки передатчика у буквы, под лежащей передаче, вызывает остановку коллектора, вследствие чего прерывания линейного тока прекращаются, корректирующее колесо останавливается и вместе с ним прекращает движение стрелки приемника, указывая переданную букву.

тропривода. В телеграфах с синхронно-синфазной связью стрелки передающего и приемного аппаратов совершали равномерно-прерывистое шаговое движение, перемещаясь с одинаковой скоростью (синхронно) и занимая одинаковое пространственное положение (синфазно) (рис. 4-40).

В середине XIX в. были разработаны конструкции буквопечатающих телеграфов (1850 г. — Якоби, 1855 г. — Юз).

В течение двух-трех десятилетий после изобретения электромагнитных телеграфов многие страны открылись

густой сетью телеграфных линий и были проложены линии телеграфной связи между континентами. Благодаря ряду усовершенствований, внесенных учеными многих стран в телеграфию, телеграф в середине прошлого столетия превратился в средство надежной и быстрой связи между самыми отдаленными частями земного шара.

Минная электротехника

Среди первых неэнергетических применений электричества следует отметить использование его в военном деле и прежде всего для воспламенения пороховых зарядов.

Существовавшие ранее пиротехнические методы воспламенения страдали рядом существенных недостатков, в особенности в случае применения для взрыва подводных мин. Для обеспечения надежного воспламенения подводных мин необходимо было создать хорошо изолированный проводник и специальный электрический запал. Эта проблема впервые была успешно разрешена в 1812 г. П. Л. Шиллингом, осуществившим на Неве опыты по электрическому взрыванию подводных мин.

Дальнейшие работы в области минной электротехники развивались в направлении совершенствования электрических запалов, создания специальных электрических машин и приборов для их питания («взрывные» машинки, индукционные катушки) и автоматизации самого процесса взрывания мины при ее соприкосновении с кораблем. Так, например, Б. С. Якоби в начале 40-х годов были разработаны специальный магнитоэлектрический генератор и индукционный прибор, которые были приняты на вооружение русской армии. Созданием этих приборов было положено начало батарейной и генераторной системам зажигания с применением индукционной катушки. Именно в минном деле впервые получил применение такой широко распространенный электротехнический прибор, как индукционная катушка, предложенная Б. С. Якоби. Б. С. Якоби, а также многими другими отечественными и зарубежными военными электротехниками были разработаны разнообразные электроавтоматические приборы, обеспечивающие взрыв мины при ее соприкосновении с кораблем.

Таким образом, развитие электромагнитной телеграфии и минной электротехники способствовало интенсивному развитию электротехники вообще и, в частности, разработке основ электроизоляции техники, совершенствованию источников тока, разработке первых электроавтоматических устройств.

4.5. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКИ

Характерной особенностью рассматриваемого периода являются первые попытки использования электрической энергии для целей автоматического контроля, управления и регулирования. Если ранее для этого применялись различные механические устройства, то, начиная с 30-х годов XIX в., в автоматических приборах и установках получают все большее применение разнообразные электромеханические элементы. Происходит качественный сдвиг в развитии автоматики и телемеханики: зарождается новая область техники — электроавтоматика. Эффективность использования электричества в автоматических и телемеханических устройствах определялась прежде всего свойством электрического тока быстро распространяться по проводу.

Основными элементами простейших электроавтоматических и телемеханических устройств были электромагниты и электромагнитные реле.

Как уже отмечалось, первые элементы электроавтоматики нашли применение в электромагнитной телеграфии и минном деле. К их числу могут быть отнесены электромагнитные реле в телеграфах Шиллинга и Якоби, электромеханический регистратор импульсов в пишущих телеграфах, устройства синхронизированного вращения в стрелочном и буквопечатающем телеграфах, релейные устройства для автоматического замыкания электрической цепи в телеграфах и минных установках.

В середине прошлого века разрабатываются электроавтоматические устройства для регистрации малых промежутков времени, контроля некоторых производственных процессов, создается ряд схем дистанционного управления.

Одним из первых наиболее совершенных регистрирующих устройств была электробаллистическая установка К. И. Константинова (1842—1845 гг., рис. 4-41) с электромагнитным хроноскопом и автоматическим переключателем цепей — прототипом распределителя — элемента современных автоматических и телемеханических установок. С помощью указанных устройств Константинову удалось осуществить измерение малых промежутков времени с точностью до $0,00006 \text{ сек.}$ Эту задачу он свел к определению времени, необходимого пушечному ядру для преодоления расстояния между электрически соединенными щитами, поставленными на пути его полета. Приборы, созданные Константиновым, автоматически сигнализировали и регистрировали момент прохождения ядра сквозь щит.

Самым распространенным электроавтоматическим устройством в 50—70-х годах XIX в. были электромагнитные регуляторы в дуговых электрических лампах, обеспечивавшие автоматическое регулирование расстояния между электродами дуги. До появления свечи Яблочкова (1876 г., см. гл. 6) электромагнитные регуляторы являлись наиболее важным и основным конструктивным узлом дуговых ламп, без которого последние не могли работать. Фактически большая часть дуговых ламп отличалась друг от друга только устройством регуляторов.

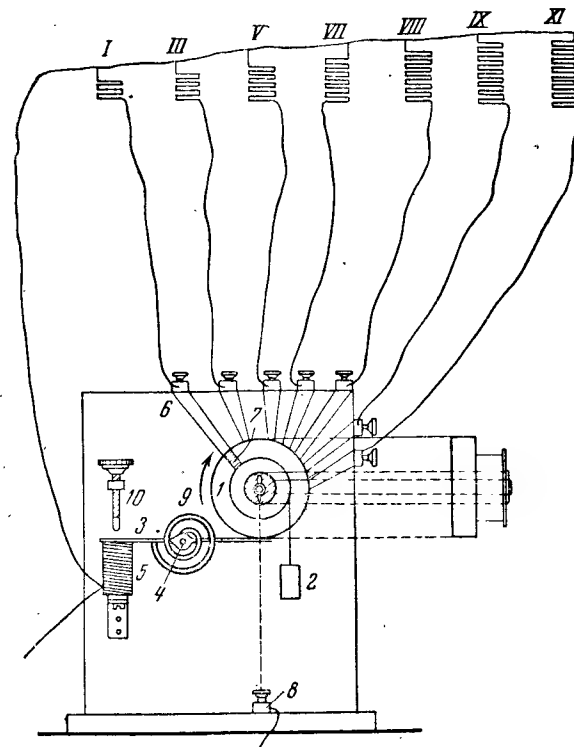


Рис. 4-41. Схема автоматического переключателя.

1 — двухступенчатый деревянный цилиндр, приводимый во вращение грузом 2; при прохождении тока через электромагнит 5 тормозящий рычаг 3, насаженный на ось 4, удерживает цилиндр от вращения; при разрыве ядром проводов щита 1 цепь электромагнита — источник тока (зажим 8) размыкается и спиральная пружина 9 отводит тормозящий рычаг до упора 10; цилиндр приходит во вращение до тех пор, пока контактная пластина 7 не придет в соединение с пружиной следующего щита 11 и цепь электромагнита снова замкнется. Так же осуществляется переключение следующих щитов.

По электрической схеме регуляторы разделялись на три группы: последовательного питания, параллельного питания и дифференциальные.

В регуляторах с последовательным питанием (рис. 4-42) катушка регулятора включается последовательно с дугой. Подвижные части регулятора рассчитывались и изготовлялись таким образом, чтобы вес верхнего угледержателя (с углем) P_1 был всегда больше веса сердечника электромагнита P_2 ; таким образом, при условии $P_1 > P_2$ угли при отсутствии тока будут сомкнуты. При включении тока сердечник будет втянут, и возникнет дуга. Втягивание продолжится до тех пор, пока втягивающее усилие P не станет равным разности весов угледержателя и сердечника, т. е.

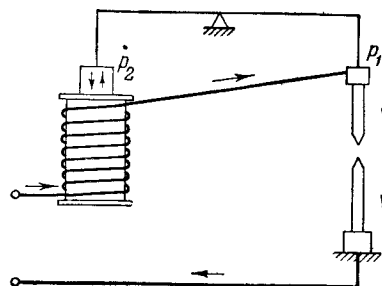


Рис. 4-42. Схема регулятора с последовательным питанием.

пока не будет выполнено условие $P = P_1 - P_2$. Когда угли обгорят, сопротивление дуги возрастет;

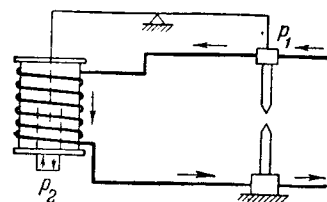


Рис. 4-43. Схема регулятора с параллельным питанием.

при этом ток в цепи уменьшится, втягивающее усилие $P = knI$ уменьшится (здесь n — число витков, k — постоянная катушки, I — ток) и сердечник выйдет вверх из катушки, угли сблизятся, а ток дойдет до нормальной величины. Таким образом, регулятор поддерживает динамическое равновесие. Для этих регуляторов имеем: $I = \frac{P}{kn} = \text{const}$, т. е. ток есть величина постоянная, пока остается постоянным втягивающее усилие P .

В регуляторах с параллельным питанием (рис. 4-43) катушка включается параллельно с дугой. Подвижные части регулятора рассчитываются и изготовляются таким образом, чтобы вес верхнего угледержателя (с углем) P_1 был всегда меньше веса сердечника электромагнита P_2 ; таким образом, при условии $P_1 < P_2$ угли в отсутствие тока разведены.

При включении лампы к катушке приложено наибольшее напряжение, по обмотке электромагнита проходит максимальный ток и сердечник быстро втягивается (снизу вверх); при этом угли приходят в соприкосновение; как только это произойдет, напряжение на катушке (равное в этот момент току, проходящему через угли, умноженному на сопротивление углей) уменьшится и соответственно уменьшится обтекающий катушку ток; сердечник опустится, угли раздвинутся, и зажжется дуга. Раздвижение углей прекратится, когда втягивающее усилие P станет равным $P_2 - P_1$ (здесь $P = kni$, где i — ток возбуждения, проходящий по катушке).

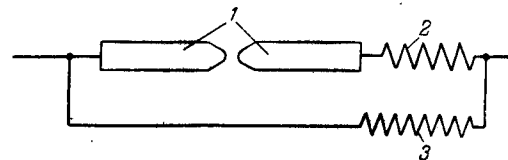


Рис. 4-44. Электрическая схема дифференциального регулятора.

1 — угли; 2 — последовательная обмотка; 3 — параллельная обмотка.

Но величина $i = \frac{U}{r}$, т. е. частному от деления напряжения (на углях) на сопротивление обмотки. Следовательно, $P = kn \frac{U}{r}$, откуда $U = \frac{Pr}{kn} = \text{const}$. Регулятор в этом случае стремится поддерживать постоянной величину напряжения на углях.

В дифференциальном регуляторе (электрическая схема которого представлена на рис. 4-44) горение дуги регулируется как последовательным, так и параллельным регулирующими устройствами. Положение подвижной системы определяется разностью действий этих двух устройств (отсюда и наименование регулятора). В этом случае $P_1 \approx P_2$, и величина U/I , т. е. сопротивление дуги, остается всегда примерно постоянной. Регулятор начинает работать при любом положении углей после выключения лампы. В зависимости от этого положения вначале будет действовать либо параллельная, либо последовательная обмотка электромагнитов, а затем все время горения лампы совместно действуют обе обмотки и поддерживается динамическое равновесие. Поскольку такой регулятор работает независимо от изменений параметров цепи, любое число ду-

говых ламп с дифференциальными регуляторами можно включать в цепь, питаемую одним генератором. Что касается использования регуляторов с последовательным или параллельным питанием, то включение нескольких дуговых ламп с такими регуляторами последовательно в одну цепь нередко приводило к нарушению режима работы ламп вследствие различных степеней чувствительности регуляторов.

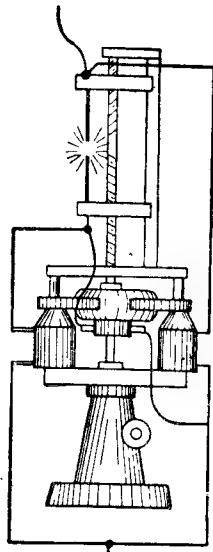


Рис. 4-45. Дифференциальная лампа Чиколева с электромашинным регулятором.

при котором угли сближались. В случае уменьшения сопротивления дуги, т. е. при чрезмерном сближении углей, преобладало действие последовательной обмотки, направление магнитного потока между полюсными наконечниками изменялось, и якорь двигателя начинал вращаться в противоположную сторону, раздвигая угли. Одним из важных достоинств этой лампы являлось то, что ее световой центр практически не изменял своего положения, т. е. лампа обладала свойством, особенно ценным для прожекторной техники. Возможные небольшие смещения светового центра могли регулироваться рукояткой, с помощью которой поднималась или опускалась вся система.

Наиболее совершенные дифференциальные регуляторы были разработаны В. Н. Чиколевым в 1869—1879 гг. Среди этих конструкций следует особо отметить регулятор, в котором электромагниты с рычажным механизмом были заменены электрическим двигателем; последовательная и параллельная обмотки регулятора служили обмотками возбуждения двигателя. В этом устройстве (1874 г., рис. 4-45) впервые в мировой электротехнической практике был применен метод электромашинного регулирования. Обмотка якоря двигателя, так же как и обмотка одного из электромагнитов, включалась последовательно с дугой, а обмотка второго электромагнита — параллельно с дугой. Действие электромагнитов было встречным, т. е. в каждый момент преобладало действие либо одного, либо другого электромагнита. Если при обгорании углей дуга удлинялась, то преобладало действие параллельной обмотки и якорь вращался в таком направлении,

В 60—70-х годах XIX в. в связи с развитием телефонии создаются специальные автоматические устройства — искатели, коммутаторы и т. п.

В рассматриваемый период были разработаны электротермические, электрохимические, электромагнитные и электромашинные исполнительные устройства.

В 70-х годах начинают конструировать более сложные электроавтоматические устройства, получившие в современной технике название следящих систем.

4.6. НАЧАЛО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В рассматриваемый период было положено начало энергетическим применениям электричества, из которых наиболее значительным по масштабам явилась промышленная электрохимия.

На развитие этого направления техники огромное влияние оказало открытие гальванопластики (Б. С. Якоби, 1838 г.), которая позволила получать электролизом точные копии с поверхности предметов и сразу же нашла практическое применение в полиграфии, медальерном деле и других отраслях промышленности. Она явилась истоком созданного Якоби метода нанесения на поверхность предмета металлических покрытий — гальваностегии. В середине прошлого века в России и за границей возникли крупные гальванотехнические промышленные предприятия, на многих заводах были созданы гальванические мастерские.

В начале 40-х годов был разработан метод рафинирования меди посредством электролиза для отделения от нее золота, серебра и платины (М. Лейхтенбергский), освоены новые технологические методы изготовления гальваническим путем бесшовных медных труб и ряд других электрохимических процессов. Развитие промышленной электрохимии также сыграло важную роль в истории электротехники; оно вызывало необходимость совершенствования источников постоянного тока и углубления электрохимических исследований. Так, например, многочисленные работы, проводившиеся с целью создания экономичного генератора постоянного тока, в значительной степени диктовались требованиями развивавшегося гальванотехнического производства.

К середине прошлого века относятся и первые опыты электрического освещения — области энергетического применения электричества, получившей очень широкое разви-

тие после 70-х годов XIX в. и сыгравшей исключительно важную роль в становлении электротехники как самостоятельной отрасли техники. Более подробно развитие электрического освещения будет изложено в гл. 6. Для рассматриваемого периода важно подчеркнуть роль первых опытов электрического освещения в том отношении, что они стимулировали дальнейшее совершенствование генераторов электрической энергии и вызвали потребность в разработке специальных электроавтоматических устройств — регуляторов, для поддержания необходимого расстояния между электродами дуговых ламп.

4-7. НАЧАЛО ЭЛЕКТРОПРИБОРОСТРОЕНИЯ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Развитие исследований в области электрических и магнитных явлений и расширение их практических применений вызвали необходимость разработки методов измерений основных электрических величин и создания специальных электроизмерительных приборов.

Принцип действия первых электрических приборов был основан на отклонении магнитной стрелки электрическим током. Однако такие приборы являлись по существу лишь индикаторами тока. Первым индикатором электрического тока был мультипликатор И. Х. Швейггера (рис. 4-46), созданный в 1820 г. Он представлял собой рамку, состоящую из нескольких витков проволоки, внутри которой помещалась магнитная стрелка. Опыты показали, что увеличение числа витков катушки усиливает действие тока на стрелку¹.

Однако вследствие влияния земного магнетизма на магнитную стрелку мультипликатора его показания были неточными. В 1821 г. была найдена (Ампером) возможность устранения влияния земного магнетизма с помощью аstaticеской пары, представляющей собой две магнитные стрелки, укрепленные на общей оси и расположенные параллельно друг другу, причем полюсы стрелок обращены в разные стороны. В 1825 г. итальянский физик Л. Нобили

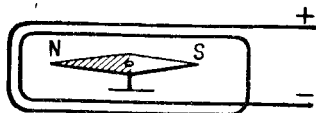


Рис. 4-46. Схема мультипликатора.

¹ Отсюда название прибора — «мультипликатор», что в переводе на русский язык означает «умножитель».

скомбинировал аstaticескую пару с мультипликатором и устроил более чувствительный прибор.

Для практических измерений необходимы были приборы с непосредственным отсчетом, заранее проградуированные, по которым можно было бы отсчитывать измеряемые величины. Вполне понятно, что вначале наибольшая потребность возникала в непосредственном измерении величины тока, протекающего по проводнику. Первым шагом в этом направлении было создание стрелочных приборов, в которых синус или тангенс угла отклонения стрелки был пропорционален величине тока. Такие приборы назывались соответственно синус-гальванометрами и тангенс-гальванометрами. В 30-х годах XIX в. широкое распространение получил тангенс-гальванометр профессора Гельсингфорского университета И. Нервандера.

Однако непосредственное определение измеряемой величины с помощью такого прибора было трудным. Необходимо было отградуировать прибор. Первая попытка отградуировать гальванометр была сделана в 1839 г. Б. С. Якоби. Включив гальванометр последовательно в одну цепь с вольтметром¹, Якоби смог установить зависимость между величиной тока, определяемой посредством электролиза, и отклонением магнитной стрелки гальванометра. Таким образом, было установлено понятие о градуированном на величину тока гальванометре и введен метод градуировки, получивший широкое распространение.

Большое значение для развития электроприборостроения имело создание электромагнита (1825 г., У. Стерджен). Начиная со второй четверти XIX в., электромагниты стали широко использоваться в различных электрических приборах и устройствах.

Наличие в распоряжении физиков и электротехников таких устройств и деталей, как электромагнит, реле, аstaticеская пара, зеркальная шкала, пружины для создания противодействующего момента, позволяло перейти к построению более совершенных электроизмерительных устройств.

Уже в первой половине XIX в. создаются более чувствительные и точные гальванометры, электродинамометр, аstaticеский гальванометр и т. п. Успехи в области теоре-

¹ Вольтметр — прибор, основанный на химическом действии тока и предназначенный для измерения количества электричества, прошедшего через электролит. Предложен был в 1834 г. М. Фарадеем.

тических и экспериментальных исследований привели к открытию новых методов электрических и магнитных измерений. К ним относятся разработка баллистического метода измерений (Э. Х. Ленц, 1832 г.), компенсационного метода (И. Поггендорф, 1841 г.), мостиковой измерительной схемы (Ч. Уитстон, 1843 г.) и др.

Баллистический метод основан на измерении с помощью баллистического гальванометра импульсов количества электричества, наведенных при изменении потокоцепления в витках катушки, включенной в цепь гальванометра. Баллистический гальванометр отличается от обычного зеркального гальванометра значительно большим моментом инерции подвижной части прибора, что обеспечивает движение его рамки после прекращения тока в ней. Основы теории баллистического гальванометра были разработаны Ленцем. Действие наведенного тока рассматривалось как мгновенный удар (отсюда происходит название прибора: баллиста — древнегреческое метательное орудие), под влиянием которого стрелка мультипликатора отклоняется с определенной скоростью, причем эта скорость пропорциональна $\sin \alpha/2$, где α — угол наибольшего отклонения стрелки.

Компенсационный метод измерений значительно повышает точность измерений. Основным достоинством этого метода является то, что измерение производится при полной компенсации токов в отдельных ветвях, когда через индикатор ток не проходит (нулевое показание). При этом исключаются погрешности, вызываемые падением напряжения в проводах, неизбежным при измерении обыкновенным вольтметром. Компенсационный метод широко используется в маломощных цепях, где включение измерительных приборов связано с потреблением мощности, соизмеримой с мощностью, расходуемой в измеряемой цепи.

Развитие телеграфии и ряд других применений электричества требовали создания прибора для измерения сопротивления. В 40—60-х годах разрабатываются первые конструкции реостатов («вольтагометр» Б. С. Якоби), реохордов (И. Поггендорф), магазинов сопротивлений и других подобных им устройств.

В рассматриваемый период стабилизируются наименования основных электрических величин, постепенно устанавливаются термины: электрическое сопротивление, э. д. с., сила тока, количество электричества и др.; применение этих терминов в научной и технической литературе постепенно приобретает однозначный характер.

В течение 1830—1860 гг. было построено много измерительных приборов и разработаны методы измерений основных электрических величин. Был заложен прочный фундамент электрометрии, но она еще в основном была сосредоточена в лабораториях. Лишь с 70-х годов прошлого века происходит очень быстрое внедрение измерительных методов в широкую практику.

Что касается единиц для измерения электрических величин, то в течение рассматриваемого нами периода в этой области наблюдалось неустановившееся положение и многие исследователи должны были вводить в научный оборот свои единицы.

Понятие электрических единиц в то время иногда отождествлялось с понятием эталона. Так, для измерения электрического сопротивления Э. Х. Ленц (1838 г.) пользовался единицей, реализованной в виде эталона, имевшего характер калиброванной медной проволоки длиной 1 фут, взятой из сортамента того времени (проволока № 11). В 1848 г. Якоби создал нормальный эталон сопротивления, который получил распространение во многих лабораториях России и Европы и имел такое внешнее оформление, которое соответствует нашим современным представлениям об эталоне. «Единица сопротивления Якоби» изготовлялась в виде катушки медной проволоки длиной 25 футов весом ~22,5 г и диаметром 0,67 мм, помещенной в специальный ящик и залитой изолирующим составом. Эталоны этой единицы изготавливались серийно.

Наряду с единицей Якоби существовали также единицы сопротивления Сименса, Уитстона и др.

Путаница в этой области напоминала, по выражению Якоби, положение в общественной жизни, которое сложилось бы, если бы каждый человек пользовался своими особыми метрами или фунтами.

Необходимость установления единых международных единиц все более возрастала; в частности, в связи с тем, что телеграф превратился в международное средство связи, назрела потребность в унификации единиц сопротивления.

Большой шаг вперед в области установления общепризнанных единиц был сделан в 1861 г. Британской ассоциацией для содействия развитию наук, создавшей специальный Комитет для разработки вопроса об эталоне единицы электрического сопротивления. В состав Комитета входили такие видные ученые, как У. Томсон (Кельвин), Дж. К. Максвелл и др. Комитет расширил программу своих работ и, не ограничившись проблемой единицы и эталона сопротивления, представил в 1870 г. Ассоциации проект, в котором рекомендовалась система электрических единиц, основанная на абсолютной электромагнитной системе. Комитет предложил на рассмотрение следующие практические единицы: сопротивления — «омада» или «ом», э. д. с. — «вольт», электрической емкости — «фарада». Единицы тока и количества электричества были производными от предыдущих, и для них особых названий предложено не было.

Что касается вещественного эталона единицы сопротивления, то Комитет остановился на эталоне из проволоки (сплав 2 частей серебра и 1 части платины).

Предложение Комитета Британской ассоциации могло носить лишь рекомендательный характер, притом преимущественно для Англии. Про-

блема же приобретала большую остроту, и становилось совершенно необходимым и неизбежным рассмотрение ее в международном масштабе.

На состоявшемся в 1881 г. Международном конгрессе электриков обсуждение вопроса о единицах оказалось в центре внимания ученых. Специальная Комиссия, учрежденная Конгрессом, признала, что электрические единицы должны основываться на метрической системе, и одобрила предложенные Комитетом Британской ассоциации основные единицы: сантиметр, грамм, секунду. Из двух систем — абсолютной электростатической и абсолютной электромагнитной — рекомендовалась для применения абсолютная электромагнитная система как более удобная для измерительных целей; при этом не исключалась возможность пользования и абсолютной электростатической системой. Комиссия также решила вопрос о единицах тока и количества электричества и дала им наименования «ампер» и «кулон».

Окончательное разрешение вопрос об единицах и эталонах получил на Чикагском электротехническом конгрессе в 1893 г.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ТУРБИН

5-1. СОЗДАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТУРБИНЫ

Развитие электротехники вызвало решительный переход от поршневых паровых двигателей к паровым турбинам как основному двигателю тепловых электрических станций, способному по мощности и быстроходности обеспечить привод крупных электрических генераторов. Гидравлические турбины возникли в 30-х годах XIX в., и большинство их типов сложилось еще до становления электроэнергетики. В течение XIX и начала XX вв. гидравлические двигатели прошли большой путь развития в отношении повышения их быстроходности и мощности в одном агрегате, а также в усовершенствовании их конструкций и систем регулирования. Одновременно гидравлические турбины непрерывно совершенствовались для использования гидравлической энергии в большом диапазоне напоров.

Этапы развития гидравлических двигателей
Время применения гидравлических двигателей, насчитывающее более чем двухтысячелетнюю историю, может быть разделено на несколько периодов. Первый период — самый длинный; он продолжался от постройки первых водяных колес до середины 30-х годов XIX в. Он характеризуется применением гидравлических силовых установок, в которых использовались водяные колеса разных кон-

струкций. Механическая энергия водяных колес или использовалась на месте ее получения, или передавалась при помощи механических устройств на небольшие расстояния (обычно не более нескольких десятков метров). Вторым периодом в развитии гидравлических двигателей продолжался от середины 30-х до начала 90-х годов прошлого века. В это время был осуществлен переход к водяной турбине, подверглись изучению происходящие в ней процессы и шло усовершенствование конструкций этого двигателя. Водяное колесо потеряло значение основного двигателя и сохранилось лишь в маломощных сельских установках. Механическая энергия водяных турбин этого периода также использовалась на месте ее производства или в непосредственной близости к нему; в этом отношении практика водяных турбин еще не дала энергетике чего-либо принципиально нового по сравнению с тем, что она получила от водяных колес.

Развитие проблемы передачи энергии на расстояние посредством электрического тока положило начало новому этапу в истории использования гидравлической энергии, когда стали строиться водяные турбины для применения в гидросиловых установках, сооруженных в местах с разными характеристиками гидравлических ресурсов (по стoku, напору). Работа этих установок была направлена на превращение механической энергии на месте ее получения в энергию электрическую, передаваемую к месту ее потребления на различные расстояния.

Гидравлические машины, в которых механическая энергия движения воды или других жидкостей превращается в энергию движения вращающегося вала, можно разделить на две основные группы: а) первичные гидравлические двигатели и б) устройства для передачи и распределения энергии посредством промежуточной жидкой среды. К первой группе относятся водяные колеса и гидравлические турбины, создающие непрерывное вращательное движение рабочего вала, водостолбовые машины, гидравлические тараны, а также двигатели, использующие энергию приливов. Ко второй группе относятся гидравлические прессы, гидроприводы и различные виды гидропередач, которые получили значительное распространение в современном машиностроении и аппаратостроении.

Развитие водяных колес охарактеризовано в гл. 2. Ниже излагается развитие других гидравлических двигателей, получивших распространение в энергетической технике.

Ранние попытки
построения
гидравлических
турбин и начало
изучения процессов,
в них происходящих

Водяные колеса к началу XIX в. получили широкое распространение, но, являясь локально связанными, не могли обеспечить потребной энергией места, удаленные от водных источников. Иногда не исключалась возможность отведения воды из русла реки к месту потребления энергии, но необходимые для этого гидротехнические сооружения были слишком дорогими. Применение тепловых двигателей позволяло снабдить сравнительно дешевой механической энергией установки, расположенные вдали от источников энергии; поэтому с конца XVIII в. возрастает число паросиловых установок. Область применения водяных колес стала, таким образом, заметно ограничиваться, особенно с развитием горнорудных промыслов и металлургических мануфактур.

Водяное колесо могло работать только в условиях малых напоров (до 8 м), которыми обладали равнинные реки. Между тем громадные запасы гидравлической энергии были заключены в водных потоках со средними (8—25 м) и высокими (более 25 м) напорами. В этих условиях водяное колесо вообще не могло быть установлено. Единственная возможность для освоения громадной энергии средне-напорных и высоконапорных водных потоков заключалась в создании гидравлического двигателя, принципиально отличного от водяного колеса.

Водяные колеса приводились во вращение действием веса воды или ударом струи в лопасти. Но можно было использовать и другое физическое явление — силу реакции, создаваемой потоком воды на лопастях рабочего колеса. Таким двигателем была водяная турбина.

Толчком к развитию новых идей в области гидравлических двигателей явились труды швейцарского математика Даниила Бернулли, работавшего некоторое время в Петербургской Академии наук. В своей работе «Гидродинамика», опубликованной в 1738 г., Бернулли обобщил ряд своих исследований по вопросам гидравлики и гидродинамики и вывел уравнение, устанавливающее на основании закона «живых сил» связь между давлением и скоростью в каждой точке потока несжимаемой капельной жидкости:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{const},$$

где v — скорость движения жидкости;
 g — ускорение силы тяжести;

p — давление в рассматриваемой точке потока;

γ — удельный вес жидкости.

В этом уравнении $v^2/2g$ есть удельная кинетическая энергия, т. е. энергия, отнесенная к единице веса, а

$\frac{p}{\gamma} + z$ — удельная потенциальная энергия, состоящая

из p/γ — удельной энергии давления и z — удельной энергии положения. Этим законом устанавливается постоянство энергии каждой частицы жидкости в потоке.

Уравнение Бернулли не только отражало закон сохранения и превращения энергии для частного случая гидравлической энергии, но и отчетливо указывало на принципиальную возможность построения гидравлических двигателей двух разных классов: использующих либо кинетическую ($v^2/2g$), либо потенциальную ($\frac{p}{\gamma} + z$) составляющую полной

энергии водного потока. Кроме того, Бернулли дал теорию реактивного действия, происходящего от вытекания струи через отверстие, сделанное в стенке сосуда.

Практически это явление было использовано впервые в 1745 г. английским механиком Баркером, построившим реактивное колесо, а в 1747 г. — венгерским физиком Яношем Андрашем Сегнером. Сегнер, работавший в Геттингенском университете, создал прибор, названный сегнеровым колесом, явившийся прототипом реактивного гидравлического двигателя, но не имевший в своем начальном виде практического значения. Первое подробное описание сегнерова колеса относится к 1750 г. В последующем Сегнер совершенствовал конструкцию с целью практического использования своего колеса. Первоначально он построил цилиндр с двумя трубками для выпуска воды, а затем — с четырьмя трубками (рис. 5-1) и даже шестью. Последнюю из этих конструкций Сегнер пытался применить для вращения жернова, т. е. превратить этот прибор в двигатель, пригодный для энергоемкой работы. Однако недостаточное знание сущности физических процессов, происходящих в таком двигателе, не дало Сегнеру возможности рационально его усовершенствовать. Единич-

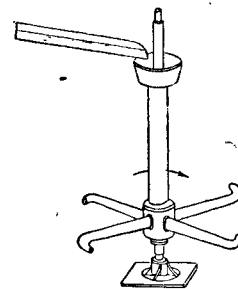


Рис. 5-1. Сегнерово колесо с четырьмя водоотводными трубками.

Рис. 5-1. Сегнерово колесо с четырьмя водоотводными трубками.

Несмотря на полную научную и техническую обоснованность конструкции водяной турбины, предложенной Эйлером, она по экономическим причинам в XVIII в. не вошла в практику и, возможно, даже не была на практике опробована. Лишь в наше время (40-е годы XX в.) в Швейцарии, на родине Эйлера, была построена действующая модель турбины с некоторыми конструктивными дополнениями для устранения разбрызгивания воды при выходе из направляющего аппарата. Испытания показали, что эта турбина имеет наибольший к. п. д. 0,712 при числе оборотов $n=180$ в минуту. Оба эти показателя характеризуют хорошие качества двигателя. Число оборотов турбины Эйлера в десятки раз превосходило число оборотов водяных колес, применявшихся в XVIII в.

Развитие водяных колес в XIX в.

К началу XIX в. в связи с успехами в области паровых двигателей, получивших после промышленного переворота распространение на предприятиях машинной индустрии, применение водяных колес сократилось, но их еще строили. Исследования ученых, особенно Ж. В. Понселе, показали, что изогнутые лопатки более эффективны, чем плоские, так как они дают возможность осуществить безударный вход воды на лопатки, что повышало к. п. д. Из металла можно было изготавливать изогнутые лопатки любого вида. Поэтому металлические водяные колеса, строившиеся различными машиностроительными заводами, начинают решительно преобладать над водяными колесами с плоскими лопатками.

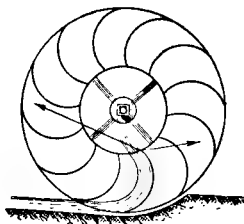


Рис. 5-3. Тангенциальное колесо Понселе.

Понселе предложил особый род подливных колес, в которых благодаря специальной форме лопаток можно было получить высокий к. п. д. (до 0,7), недостижимый в других подливных колесах (рис. 5-3). Лопаткам в колесе Понселе придавалась такая кривизна, что подводимая вода поступала на лопатки в направлении их кривизны, проходила на некоторое расстояние вверх по лопатке и затем, опускаясь, выходила наружу. При таких условиях совершенно устраняются удар воды о лопатки при входе и сопутствующие ему потери энергии. При металлических водяных колесах устраивались особые щитки для более це-

лесообразного направления воды, идущей к лопаткам колеса. Наиболее распространенными типами водяных колес, изготовлявшихся заводским путем в XIX в., являлись такие, которые предназначались для применения при малых напорах (не более 1,5 м). Таковы, например, среднебойные водяные колеса Сажбьена и водяные колеса Цуппингера. Все колеса такого рода имеют небольшую окру-

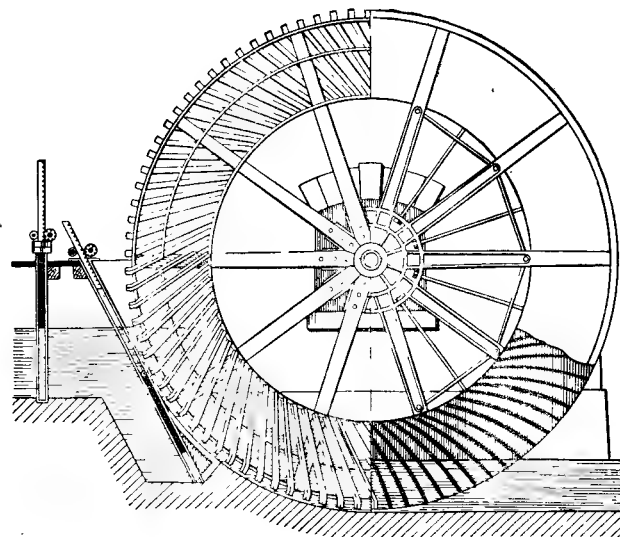


Рис. 5-4. Водяное колесо Сажбьена.

ную скорость и малое число оборотов, а потому должны быть большого диаметра, иметь значительную ширину обода и большое число лопаток. В водяном колесе Сажбьена лопатки или криволинейны по всей поверхности, или с загнутыми краями (оба типа лопаток показаны на рис. 5-4); вода благодаря наличию щитка притекает к колесу медленно и без более или менее значительных ударов, так что напор хорошо используется. Коэффициент полезного действия такого колеса доходит до 0,75.

В водяном колесе Цуппингера (рис. 5-5) ширина обода еще больше, чем в колесах Сажбьена; лопатки его имеют криволинейную форму по всей поверхности; эта форма такова, что лопатки выходят из нижнего канала нормально к поверхности воды.

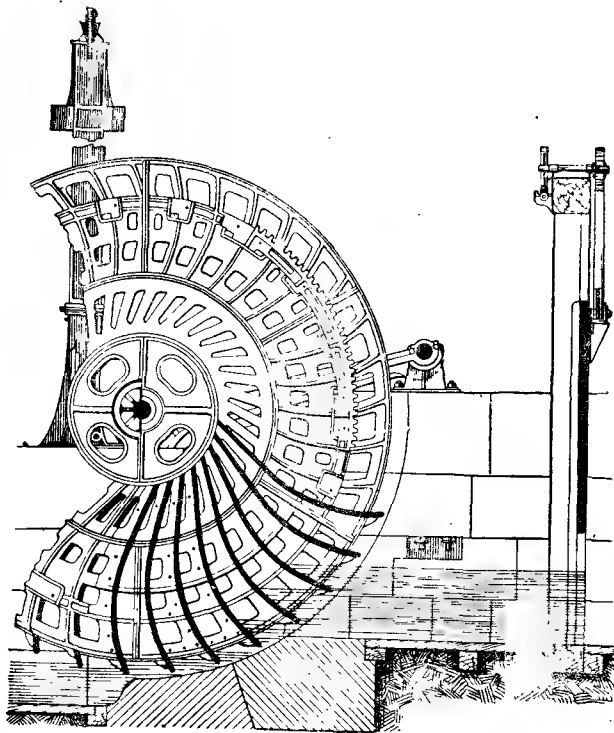


Рис. 5-5. Водяное колесо Цуппингера.

Начало практического
применения
гидравлических
турбин

Промышленный переворот явился переходом к машинному производству путем внедрения разнообразных рабочих машин, заменивших работу человеческих рук, и применения универсального двигателя. Число оборотов рабочих машин при этом сильно возросло, так как паровой двигатель мог легко обеспечить более 100 об/мин, в то время как водяное колесо делало 4—8 об/мин. Водяные колеса по этой причине оказались неспособными выполнять функцию двигателя в системах машинного производства без применения сложных передаточных устройств для увеличения числа оборотов, что было связано со значительными дополнительными потерями и снижением к. п. д. Таким образом, водяное колесо к концу XVIII в. начинает получать второстепенное значение. Оно в меньшей степени, чем паровой двигатель, использовалось нарождавшимся капита-

листическим фабрично-заводским производством, но содействовало сохранению на некоторое время экономических позиций мануфактурного производства, которое было обречено на отмирание при развитии машинного производства. На многих предприятиях черной и металлургической промышленности, в мукомольном производстве и на других предприятиях континентальной Европы водяное колесо долго еще оставалось основным двигателем. Паровой универсальный двигатель мог бы быстро исключить применение гидравлических двигателей, если бы его распространение не ограничивалось в некоторых местах серьезными препятствиями, вытекающими из феодального способа производства. Франция, свергнув феодальный режим во время буржуазной революции конца XVIII в. и уничтожив крупное землевладение, в значительной мере ослабила эти препятствия для широкого внедрения парового двигателя в промышленность. Но непрерывные войны наполеоновского времени и континентальная блокада изолировали Францию, и она не могла быстро переводить свою промышленность на рельсы машинной индустрии. Англия в это время имела безраздельную монополию на производство паровых двигателей, но не продавала их Франции, которая была лишена к тому же возможности осуществлять обходным образом их завоз на свою территорию. По этой причине именно во Франции неизбежным стало усиление стремления использовать гидравлические ресурсы. Однако водяное колесо как двигатель тихоходный не удовлетворяло потребностям машинного производства. В области гидравлических двигателей нужно было догнать паровую машину по быстроходности и, таким образом, сделать гидравлический двигатель отвечающим новым требованиям, которые стали предъявляться к фабрично-заводскому двигателю после промышленного переворота.

В силу сказанного гидравлическая турбина получила во Франции раньше, чем в других странах, свою техническую разработку и внедрение в машинное производство.

В 1789 г. во Франции было организовано «Общество для поощрения национальной промышленности», учредителями которого были крупнейшие предприниматели, владевшие мануфактурами, и чиновники учреждений, ведавших промышленностью. Своею целью эта организация ставила содействие ускорению развития национальной промышленности путем помощи изобретателям и ученым, популяризации новейших технических идей и усовершенствований в об-

ласти техники, промышленности и сельского хозяйства. Эта организация объявляла публичные конкурсы на разработку тех или иных технических вопросов, представлявших особый значительный интерес для промышленности Франции. Среди различных проблем, на которые обратило внимание это общество, важное место заняла проблема гидравлического двигателя.

В 1824 г., исходя из этих соображений, «Общество» объявило открытый конкурс на построение гидравлического двигателя. В качестве исходного типа нового двигателя в конкурсных условиях отмечалось лежащее водяное колесо, установленное еще в XVII в. во Франции (в Базакле) и описанное в книге французского инженера Б. Ф. Белидора (1737 г.). За проект двигателя, который удовлетворял бы условиям конкурса, объявлялась премия в 6 тыс. франков, а крайний срок представления проектов был трехлетний (1827 г.). Хотя задача, выдвинутая на конкурсе, была в высшей степени актуальной, тем не менее она не увлекла конструкторов даже при довольно высокой для своего времени премии за представленный и принятый проект. К объявленному сроку были представлены только два проекта. На один из них, принадлежащий проф. К. Бюрдену, обратили внимание. Бюрден за 2 года до конкурса представил в Парижскую академию наук доклад о новом гидравлическом двигателе, который им был назван гидравлической турбиной¹. Опытный экземпляр этого двигателя был установлен на мукомольной мельнице, где и подвергся опробованию. Результаты испытания оказались мало утешительными, так как турбина имела конструктивные недостатки.

Несмотря на то, что турбина Бюрдена не дала удовлетворительного решения конкурсной задачи, автор, применив направляющий аппарат, сделал заметный шаг вперед в области создания гидравлического двигателя нового типа, и ему была выдана поощрительная премия в 2 000 франков. «Общество» объявило вторичный конкурс на ту же тему с пятилетним сроком представления проектов (июль 1832 г.). На этом втором конкурсе фигурировал гидравлический двигатель Бенуа Фурнейрона. Кроме проекта и изготовленных экземпляров турбины, Фурнейрон представил на конкурс свою книгу «Гидравлические турбины и их широкое применение на рудниках и мануфактурах».

¹ Слово турбина происходит от латинского слова turbo, что означает круговое движение или быстрое вращение.

Турбина Фурнейрона (рис. 5-6) являлась реактивным гидравлическим двигателем радиального типа с движением воды через направляющий аппарат от центра к периферии. Представленный на конкурс образец имел мощность в пределах 50—70 л. с., число оборотов более 60 в минуту, к. п. д. 0,7—0,8. В начале 1836 г. турбина Фурнейрона была установлена в Инвале на текстильной фабрике, имевшей 450 разных станков. В отчете Парижской Академии наук о работе этой пионерной установки указывалось, что, применив особые внутренние ободья при лопатках рабочего колеса и соответствующие опускающие затворы, удалось добиться такой регулировки турбины, что она работала с одинаковым к. п. д. как при половодьи, так и при низком стоянии воды поздней осенью; в последнем случае понижалась лишь мощность.

Французский академик А. Морен произвел очень подробное исследование действия турбин Фурнейрона, а в 1838 г. специальная комиссия Академии наук изучила результаты этого исследования. Понселе в своем сообщении Академии о гидравлических двигателях высоко оценил результаты работ Фурнейрона; он же разработал теорию механического действия гидравлической турбины Фурнейрона. На промышленной выставке 1839 г. в Париже Фурнейрон экспонировал свою гидравлическую турбину и был награжден большой золотой медалью.

В начале 40-х годов Парижская академия ходатайствовала перед правительством о замене водяных колес на парижской водопроводной станции турбинами. Фурнейрон разработал проект гидротурбинной станции на 6 000 л. с., однако городское управление не осуществило такой реконструкции, и несколько позднее для водопровода была оборудована паросиловая установка.

В России, богатой реками и располагавшей большим числом предприятий, расположенных вблизи рек, проблема усовершенствования гидравлического двигателя была осо-

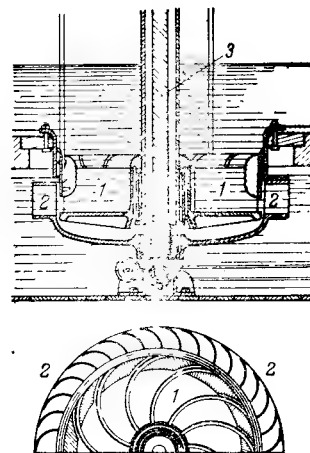


Рис. 5-6. Гидравлическая турбина Фурнейрона.

1 — направляющий аппарат; 2 — рабочее колесо; 3 — вал турбины.

бенно актуальной. Не случайным поэтому является то обстоятельство, что уже в 1837 г. в России была построена первая водяная турбина такого же типа, как турбина Фурнейрона. Ее конструктор — плотинный мастер И. Е. Сафонов — установил ее на Алапаевском металлургическом заводе. Через несколько лет такого рода водяные турбины были построены на Ирбитском и Нейво-Шайтанском за-

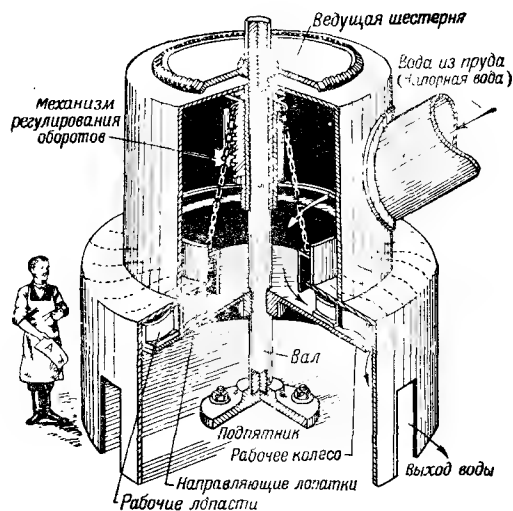


Рис. 5-7. Гидравлическая турбина Сафонова.

водах на Урале. На рис. 5-7 показана водяная турбина, установленная на Нейво-Шайтанском заводе. Она имела мощность около 60 л. с. при напоре 3,45 м. Для регулирования расхода воды в турбине был устроен особый подъемный щит. По произведенным подсчетам ее к. п. д. было около 0,7.

Работы Сафонова по построению реактивных турбин, которые он вел в 1835—1837 гг., хронологически следовали за работами Фурнейрона, но Сафонов вел эти работы совершенно самостоятельно, и многие отдельные вопросы ему приходилось решать, исходя из собственного опыта и в ином виде, чем это имело место в конструкциях Фурнейрона.

5-2. РАЗВИТИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ТУРБИН ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XIX в.

Успех первых турбин Фурнейрона, разработка Понселе теоретических основ работы этой турбины, позволявшая с достаточной точностью рассчитывать гидравлические турбины, а также все возраставшее требование повысить скорость вращения и экономичность водяного двигателя были причиной того, что, начиная с 40-х годов XIX в., гидротурбостроение стало совершенствоваться, а водяные колеса начали все более и более вытесняться турбинами.

В это время было уже установлено, что существенное отличие турбины от водяного колеса заключается в том, что в турбине вода входит на одну кромку лопатки турбины, проходит по лопатке и сходит с другой кромки лопатки, не меняя направления своего движения по лопатке. В водяном же колесе вода входит и выходит в одном и том же месте, совершая перемещение по лопатке в обратную сторону; вследствие этого как скорость, так и направление движения воды в некоторой точке лопатки различны в разные моменты времени. В турбине вода не останавливается, не меняет направления своего течения на обратное, а от входных до выходных кромок течет непрерывно, и в каждой точке лопатки скорость ее одинакова по направлению и отличается только по величине. Так как вода имеет возможность вступать в рабочее колесо теоретически с любой скоростью, то турбина может, во-первых, применяться в широком диапазоне напоров и, во-вторых, развивать большее число оборотов, чем водяное колесо. Кроме того, в турбине вода проходит одновременно по всем лопаткам рабочего колеса, а в водяном колесе — лишь по небольшой их части; это приводит к уменьшению размеров турбины по сравнению с водяным колесом.

Из уравнения механики

$$M = 7120 \frac{N}{n}$$

видно, что увеличение числа оборотов n при одной и той же мощности N позволяет получить меньший крутящий момент M на валу турбины. Поэтому размеры вала, зависящие от M , уменьшаются и вся конструкция становится значительно компактнее. Меньшие размеры и вес турбины облегчают конструкцию опор для вала, упрощают смазку и уход, облегчают пуск двигателя в ход. Наконец, при одной и той же окружной скорости на ободе двигателя, про-

порциональной скорости подводимой воды, число оборотов турбины больше, чем водяного колеса, так как диаметр ее меньше. Это обстоятельство упрощает передаточные механизмы или даже делает их в отдельных случаях ненужными.

Основные типы гидравлических турбин и развитие их отдельных составных частей

Хотя в течение XIX в. было построено довольно много водяных турбин разных конструкций, их можно классифицировать по отдельным признакам. Прежде всего водяные турбины делятся на два основных класса: *ре-*

активные и активные.

В реактивных турбинах вода заполняет все каналы между лопатками направляющего аппарата и рабочего колеса. Это так называемые полные или напорные турбины. Энергетический процесс в них протекает в основном за счет изменения суммы энергии давления $\frac{P}{\gamma} + z$ и частично кинетической энергии $v^2/2g$. При реактивной турбине может применяться отсасывающая труба, которая, дает возможность поднять турбину на высоту до 10,33 м над нижним уровнем (т. е. на высоту водяного столба, соответствующего давлению 1 ат).

Реактивные турбины способны работать при большом пропуске воды (расходе). Так как мощность гидравлической турбины пропорциональна напору H и расходу воды Q , то реактивные турбины могут развивать значительную мощность N при малых напорах H за счет больших расходов Q и поэтому удобны для использования на равнинных реках.

Активные турбины обладают тем свойством, что вода проходит через турбину свободно, не заполняя всего рабочего колеса или действуя на часть его, причем давление среды, окружающей воду в турбине, всюду одинаково. В турбинах этого рода передача энергии, приносимой потоком воды в рабочее колесо, осуществляется в основном за счет изменения кинетической энергии воды. Эти турбины получили также название свободноструйных. Активные турбины пригодны в условиях переменного и, в частности, малого количества воды, но при больших напорах. Активные турбины могут действовать при одновременной работе не всех, а только части рабочих лопаток. Такие турбины носят название парциальных; в этом случае направ-

ляющий аппарат может строиться в виде неполного колеса или отдельных трубчатых сопел (насадок) с приспособлениями для регулирования пропуска воды.

Водяные турбины могут быть либо с горизонтальным валом, на который насажено рабочее колесо, либо с валом вертикальным. В соответствии с этим различают турбины горизонтальные и вертикальные.

Наиболее естественным представляется размещение направляющего аппарата турбины над рабочим колесом (рис. 5-8). В таких турби-

нах движение воды будет происходить по цилиндрическим поверхностям, ось которых параллельна оси рабочего колеса; подвод воды также происходит в направлении, параллельном этой оси. Такие турбины получили название *осевых* или *аксиальных* реактивных турбин. Но такое размещение не является единственным возможным и не было исторически первым в развитии водяной турбины. Первая турбина, построенная Фурнейроном, имела подвод воды к рабочему колесу из направляющего аппарата в радиальном направлении, причем рабочее колесо охватывало направляющий аппарат (рис. 5-7). Такого типа реактивные турбины носят название *радиальных*; исходя из того, что направление воды в турбине соответствует направлению центробежной силы, такие турбины иногда назывались центробежными; более правильное их наименование — турбины с внутренним радиальным подводом воды. В случае, если относительное расположение направляющего аппарата и рабочего колеса обратно предыдущему, как это показано на рис. 5-9, т. е. если приток воды происходит в радиальном направлении от периферии к центру, то двигатель называется турбиной с наружным радиальным подводом воды (иногда их называли центростремительными). Этот второй тип оказался практически более удобным, так как размеры вращающегося рабочего колеса при этом получаются меньшими, более удобно применять

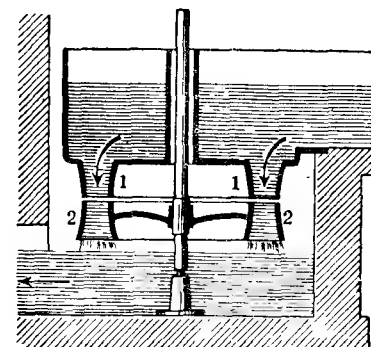


Рис. 5-8. Гидравлическая турбина Геншеля-Жонваля (с размещением направляющего колеса 1 над рабочим колесом 2).

19 История энергетической техники.

в этой конструкции отсасывающую трубу, можно видоизменять конструкцию рабочего колеса применительно к разным числам оборотов. -

Наконец, возможно такое устройство реактивной турбины, при котором вода претерпевает в лопатках рабочего колеса изменение радиального направления на осевое. Такие турбины называются *радиально-осевыми* турбинами. Радиально-осевые турбины позволили удобно сочетать рабочее колесо турбины с горизонтально расположенным на-

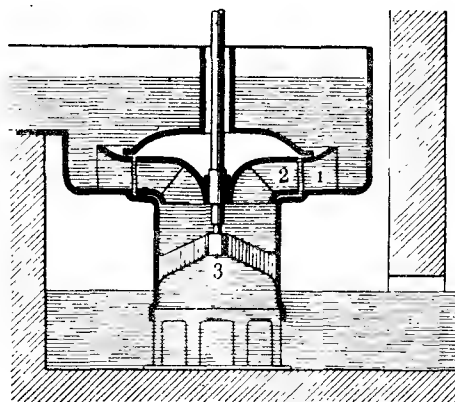


Рис. 5-9. Радиально-осевая турбина (с наружным подводом воды).

1 — направляющий аппарат; 2 — рабочее колесо; 3 — подпятник вала.

правляющим аппаратом и вертикальной отсасывающей трубой и получили значительное распространение. Возможно также построение диагональных турбин, имеющих преимущество в быстроходности двигателя.

Вскоре после радиальной реактивной турбины Фурнейрона был предложен ряд других реактивных турбин, среди которых наибольшее распространение получили турбина К. А. Геншеля (Германия, 1837 г.) и турбина Жонваля (Франция, 1843 г.). Обе эти турбины осевого типа; они сходны по конструкции и вошли в практику под наименованием турбин Геншеля—Жонваля (см. рис. 5-8). Такие турбины строились как горизонтальными, так и вертикальными. В них лопатки направляющего колеса и рабочего колеса имеют форму винтообразно искривленных поверхностей, причем направление кривизны лопаток направляю-

щего колеса противоположно направлению кривизны лопаток рабочего колеса. Турбины Геншеля—Жонваля стали строиться с новым основным рабочим органом — *отсасывающей трубой*, позволявшей использовать весь располагаемый перепад, размещая турбину настолько выше нижнего уровня воды, насколько это удобно при компоновке всей установки (в пределах 10 м). Турбина Геншеля—Жонваля быстро вытеснила турбины Фурнейрона и строилась разными заводами в течение всего XIX в.; большинство их было вертикального типа; наряду с одновенечными строились и двух- и трехвенечные турбины. Сконструированы были также сдвоенные турбины этого типа. После того как стала осуществляться передача электроэнергии на расстояние, были построены быстроходные турбины Геншеля—Жонваля для непосредственного соединения с электрическим генератором. В усовершенствовании этих турбин значительную роль сыграли русские машиностроители И. А. Тиме, В. И. Рожков, А. И. Пермяков и др.

В 1851 г. французским инженером Жираром была предложена конструкция активной осевой турбины. Турбины Жирара строились также многовенечными (рис. 5-10).

Наиболее крупный успех в XIX в. выпал на долю радиально-осевых реактивных турбин. Американский кон-

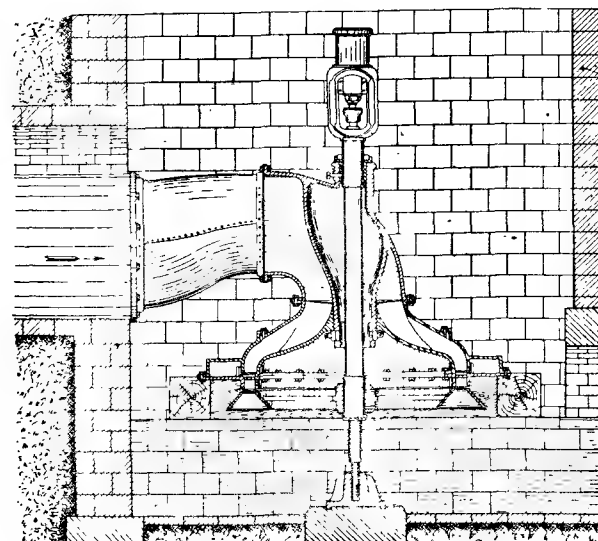


Рис. 5-10. Турбина Жирара.

структор Хауд (1838 г.; в русской литературе иногда его фамилия транскрибируется Хоуд) получил патент на радиальную турбину с внешним подводом воды (с центростремительным движением). Эта турбина была весьма подробно изучена и испытана в 1849 г. американским инженером Д. Б. Френсисом, который настолько улучшил ее, что она стала называться турбиной Френсиса (рис. 5-9). В 1855 г. американский инженер Свейт придал этой турбине характер радиально-осевой, заставив поток менять направление в пределах рабочих лопаток с радиального на осевое, что позволило удачно объединить турбину со всасывающей трубой.

После разработки типа радиально-осевой турбины оказалось возможным осуществить усовершенствование гидравлической турбины в нескольких направлениях:

а) *Применение поворотных лопаток в направляющем колесе.* Направляющие колеса ранее играли роль только устройства, обеспечивающего безударный подвод воды в рабочее колесо. Но направляющему аппарату можно было придать функции регулирующего органа турбины, если осуществлять одновременный поворот всех лопаток направляющего аппарата: от полного закрытия ими доступа воды в рабочее колесо до полного открытия всех каналов для подхода воды.

В 1877 г. Финк предложил конструкцию поворотных лопаток в направляющем аппарате радиально-осевых турбин; вращение лопаток осуществлялось поворотом их общего соединительного кольца, связанного с регулятором турбины. Эта схема регулирования расхода воды и мощности оказалась весьма удобной и эффективной, способной обеспечить лучшую маневренность двигателя. С радиально-осевыми турбинами с поворотными лопатками не могли конкурировать многие другие типы турбин (например, турбины Геншеля — Жонваля), которые и стали постепенно отмирать.

б) *Устройство отсасывающей трубы.* Уменьшение габаритов рабочего колеса в радиально-осевых турбинах позволило обеспечить рациональный отвод отработавшей воды от рабочего колеса. Этой цели способствовало применение отсасывающей трубы, которой стали снабжаться все реактивные водяные турбины с наружным подводом воды. Назначение отсасывающей трубы — отвести от рабочего колеса воду с наименьшими потерями. Ее действие основано на том, что протекающая по ней вода создает под

рабочим колесом разрежение и тем компенсирует уменьшение напора от расположения рабочего колеса турбины выше нижнего уровня.

в) *Применение спиральной камеры для подвода воды к направляющему аппарату.* Камера, подводящая воду к турбине и имеющая в плане форму спирали, обладает тем свойством, что она обеспечивает равномерность питания турбины, т. е. подводит воду во всех точках по окружности колеса с одинаковой скоростью и по одинаковому направле-

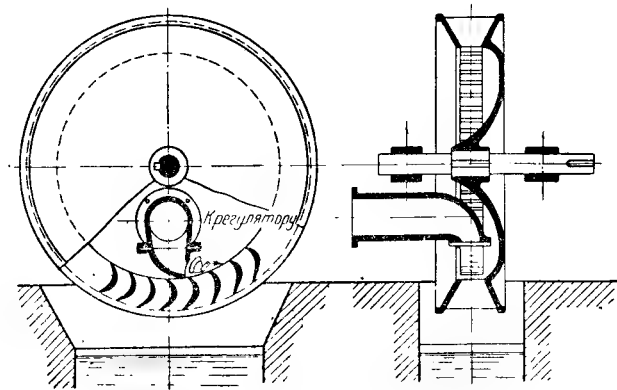


Рис. 5-11. Турбина Швамкруга.

нию. Следствием применения спиральной камеры явились улучшение работы направляющего аппарата и повышение к. п. д. турбины.

Для использования энергии воды при больших напорах были разработаны конструкции активных водяных турбин. Таковы парциальная турбина Швамкруга (рис. 5-11) и тангенциальное колесо А. Пельтона (рис. 5-12). В турбине Швамкруга рабочее колесо большого диаметра (5 м и более) имеет направляющие лопатки, расположенные внутри обода; направляющий аппарат в виде подводящей трубы входит внутрь рабочего колеса и имеет несколько (обычно пять) сопел, отверстия которых могут регулироваться посредством задвижек. Движение воды происходит по касательной к рабочему колесу, лопатки которого расширяются снаружи. Колесо Пельтона благодаря простоте конструкции и удобству применения в случае очень больших напоров и малых количеств воды получило в конце XIX в. большое распространение в практике (в этих условиях другие

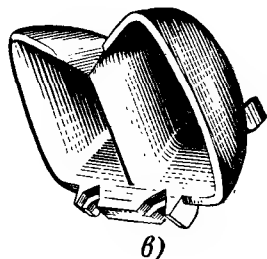
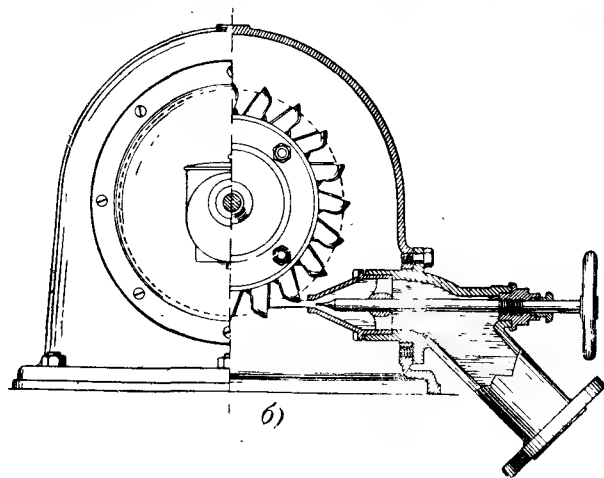
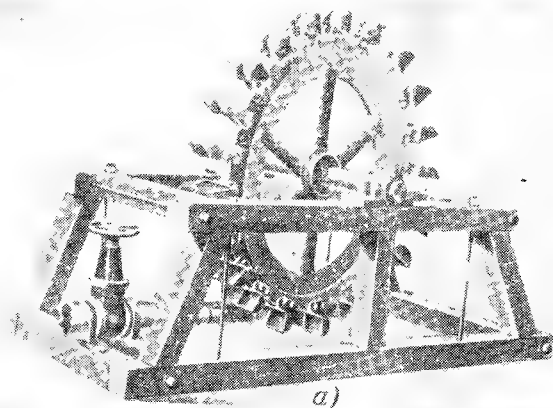


Рис. 5-12. Активная турбина Пельтона.
а — общий вид; б — разрез;
в — ковш.

турбины работают с низким к. п. д.). В этом гидравлическом двигателе нет каналов, по которым протекает вода, а имеются лишь ковшеобразные лопатки на рабочем колесе, подвергающиеся непосредственному действию воды. Колесо Пельтона является *свободнотруйной* турбиной; иногда оно называется *ковшовой* турбиной. Эта турбина является парциальной, так как действие воды в любой момент времени осуществляется на небольшое число лопаток. Как видно из рис. 5-12, на самые нижние точки колеса бьет струя воды из сопла; мощность струи регулировалась сначала язычковым затвором, а затем — особым шпинделем, вводящим в сопло («игла»). Колесо Пельтона может приводиться во вращение действием нескольких струй, выходящих из соответственным образом расположенных сопел.

5-3. РАЗВИТИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ТУРБИН В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XX в.

Создание
гидравлических
турбин высокой
быстроходности

К началу XX в. в практике закрепились в основном два типа турбин: радиально-осевая реактивная турбина и колесо Пельтона. Глубокие изменения во взглядах на возможности гидроэнергетики произошли в связи с опытами, поставленными во время Лауффен-Франкфуртской выставки 1891 г. С этого момента началась новая эра в области генерирования электрической энергии на гидравлических электростанциях. Для характеристики водяных турбин был введен коэффициент быстроходности, который означал число оборотов данного типа турбины при напоре 1 м и мощности 1 л. с. В первых радиально-осевых турбинах этот коэффициент равнялся 60—70, а к концу XIX в. он возрос до 320. Некоторые инженеры пытались доказать, что коэффициент быстроходности ни при каких условиях не может быть больше 350, но практика опрокинула эти предположения. В целях повышения коэффициента быстроходности стали стремиться распределить мощность между несколькими рабочими колесами. Появились горизонтальные и вертикальные турбины сдвоенного типа. Но это был не единственный путь к повышению коэффициента быстроходности. В 1914 г. проф. Дубс (Швейцария) доказал, что при значительном увеличении зазора между направляющим аппаратом и рабочим колесом и одновременном уменьшении длины лопаток рабочего колеса можно дове-

сти коэффициент быстроходности до 500 в обыкновенной (несдвоенной) турбине. Но при рабочем колесе с неподвижными лопатками при такой реконструкции нельзя было сохранить высокий к. п. д. Решительный прогресс в отношении коэффициента быстроходности был достигнут в 1914—1916 гг., когда проф. В. Каплан (Чехословакия) осуществил радиальный подвод воды в направляющий аппарат и осевое прохождение воды через рабочее колесо при большом зазоре между направляющим и рабочим колесами.

Гидравлические турбины, предложенные Капланом для низконапорных установок, в процессе своего развития

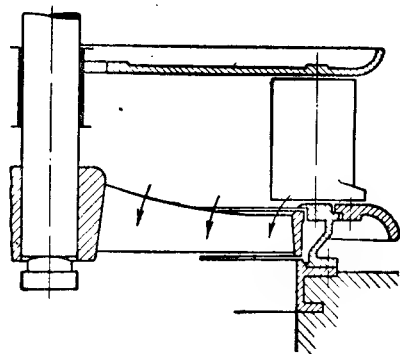


Рис. 5-13. Первоначальная конструкция турбины В. Каплана (1913 г.).

прошли две формы. Вначале согласно патенту 1913 г. эта турбина имела устройство, показанное на рис. 5-13. В этом оформлении между выходными ребрами направляющего аппарата и входными ребрами рабочего колеса имелось большое незанятое пространство; лопатки (416 шт.) были очень короткими в направлении движения воды; водному потоку в турбине предоставлялась гораздо большая свобода, чем в других турбинах, и уменьшались гидравлические потери, что приводило к повышению коэффициента быстроходности. Концы лопаток в этом типе турбины Каплана были связаны общим ободом, как это имело место и в турбинах предшествующих типов. Стремясь устранить всякие детали, могущие усложнить прохождение воды через рабочее колесо, Каплан в патенте 1916 г. предложил турбину без обода и придал рабочему колесу форму судового гребного винта. Коэффициент быстроходности достиг 1000, к. п. д. имел значение 0,8—0,82 при полном открытии турбины, которое регулировалось поворотными лопатками направляющего аппарата. Однако испытания показали, что при неполном подводе воды к рабочему колесу к. п. д. резко падает. Вследствие этого был предложен поворотный тип лопаток рабочего колеса. Изменение поворота лопаток вначале производилось от руки, а затем было автоматизи-

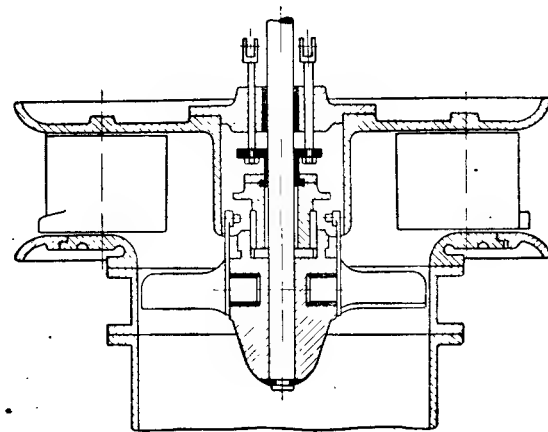


Рис. 5-14. Усовершенствованная конструкция турбины В. Каплана (1916 г.).

ровано и связано с работой поворотных лопаток направляющего аппарата, которые регулировались также автоматически. В окончательном виде (рис. 5-14) турбина перестала снижать к. п. д. при неполном подводе и стала получать все более широкое применение на практике. В настоящее время турбины этого типа носят общее название *поворотлопастных* и строятся крупнейшими заводами гидроэнергомашиностроительной промышленности.

В связи с переходом к быстроходным типам водяных турбин пришлось столкнуться с явлением вибраций, происходящих от нарушения работы рабочего колеса вследствие кавитации. Так назвали появление в некоторых местах на поверхности лопаток пустот, заполненных водяным испарением; эти испарения происходили при низкой температуре и низких давлениях, а особенно сильная кавитация наблюдалась именно в лопастях поворотлопастной турбины. Изучение этой проблемы привело к построению лопаток такой формы, что кавитация была устранена, и в турбинах с высоким коэффициентом быстроходности вибраций не наблюдалось.

Развитие теории
гидравлических
турбин

В ряде специальных курсов: А. Нератова (1841 г.), Ф. Редтенбахера (1844 г.), Ю. Л. Вейсбаха (1851 г.) и др. рассматривался вопрос о протекании воды по рабочим органам турбины на основе струйной теории. Хотя эта теория сложилась окончательно только

к концу XIX в., но уже в 1856 г. Г. А. Цейнер разработал метод расчета турбины, исходя из основ этой теории. Струйная или одноразмерная теория рассматривает поток в турбине как установившийся с некоторыми средними скоростями, причем делается допущение о полной симметрии потока относительно оси турбины. Принятые допущения позволяют разбить поток на ряд не смешивающихся друг с другом потоков, называемых «элементарными турбина-

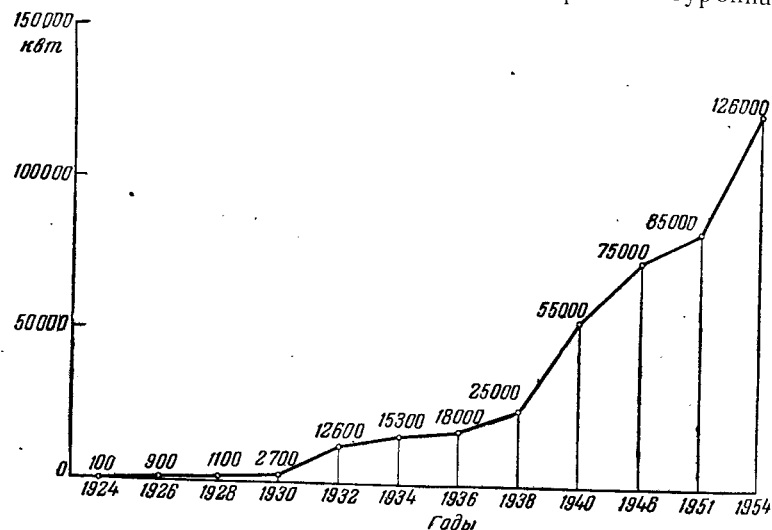


Рис. 5-15. Рост мощности единичной турбины в СССР.

ми» и рассчитываемых отдельно по уравнениям Эйлера. В течение второй половины XIX и первой половины XX вв. было предложено много методов построения формы лопаток турбин. Среди них особо важное место занимает метод немецкого проф. Г. А. Пфарра, усовершенствованный В. Капланом (метод конформных отображений). Большое значение для уточнения методов расчета турбин имела разработка ряда вопросов гидродинамики в трудах ученых конца XIX и начала XX вв. Р. Эшер и Ф. Пражили дали теоретически обоснованный гидродинамический метод расчета рабочих органов радиально-осевых турбин. Г. А. Лоренц развил идею Пражиля и дал в общем виде дифференциальное уравнение линий тока по рабочему колесу.

Прогресс, достигнутый в области гидротурбостроения за последнее столетие (1840—1940 гг.), представлен на

графиках на рис. 1-21 и 1-25; на графике на рис. 5-15 дан рост единичной мощности гидроагрегатов в СССР в 1928—1955 гг.

5-4. ПРОЧИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

Водостолбовые машины. Под таким названием известны гидравлические двигатели поршневого типа, применявшиеся главным образом во второй половине прошлого века. Они преимущественно использовались в установках небольшой мощности, особенно в водопроводных устройствах. С распространением передачи электрической энергии на расстояние водостолбовые машины потеряли свое значение, и в настоящее время они почти вышли из употребления, оставаясь в отдельных

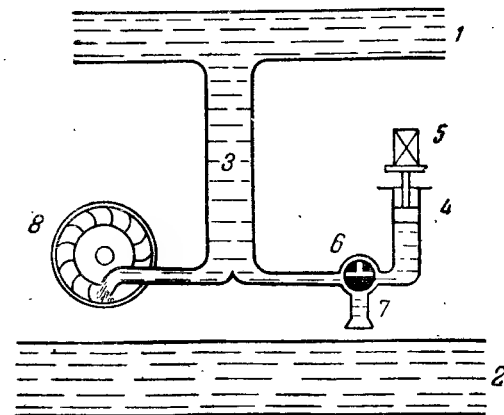


Рис. 5-16. Схема водостолбовой машины.

1—верхний уровень; 2—нижний уровень; 3—трубопровод; 4—поршень; 5—груз; 6—регулирующий кран; 7—труба для выпуска воды в нижний водоем; 8—водяное колесо.

случаях вспомогательными двигателями (гидравлический сервопривод). По принципу водостолбовых машин действуют гидравлические прессы, отдельные элементы гидравлических передач и приводов. На рис. 5-16 изображена водостолбовая машина, которая может служить как для вертикального перемещения грузов, так и для вращения вала посредством водяного колеса. Вся энергия воды используется в водостолбовых машинах в виде энергии давления. Перетекая по трубе из верхнего уровня, вода уменьшает свою энергию положения, но настолько же у нее увеличивается энергия давления. При выходе воды из насадки на водяное колесо происходит переход энергии давления воды в кинетическую энергию.

Если устроить переключение хода воды и заставлять ее производить воздействие попеременно то на одну сторону поршня, то на другую, то можно осуществлять не только подъем груза, но и опускание, а при помощи кривошипно-шатунного механизма — и вращение вала.

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В ПЕРИОД СТАНОВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ГЛАВА ШЕСТАЯ

СТАНОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ КАК САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ ТЕХНИКИ. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

6-1. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ПРИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

70-е годы XIX в. характеризуются все большим расширением практических применений электричества в условиях децентрализованного производства электрической энергии. Исходным моментом, создавшим возможность интенсивного развития электротехники в этот период, явилось построение электромашинного самовозбуждающегося генератора с кольцевым якорем. Такой генератор позволял получить наиболее совершенным для того времени способом достаточное количество электроэнергии, необходимой для питания различных приемников.

Разработка промышленного типа генератора электрического тока сделала реальным развитие энергетических применений электричества.

Расширение области энергетических применений электричества, в особенности электрического освещения, со всей очевидностью показало, что дальнейшее развитие электротехники может происходить только при условии успешного решения проблемы централизованного производства электроэнергии и ее распределения. Технические и экономические предпосылки к этому уже вполне определились в середине 70-х годов XIX в. и обусловили разработку методов и средств для передачи электрической энер-

Двигатели для использования энергии морского волнения и приливов. Энергия морского волнения и приливов достаточно велика и при удобном и рациональном превращении ее в другие виды энергии могла бы занимать заметное место в энергетике. Однако до настоящего времени в этой области, несмотря на большое число опытов и проектов, не удалось прийти к практическим решениям. В двигателях для использования энергии морских волн эта энергия используется без создания напора в виде разности уровней. Волновые гидравлические двигатели предлагались в виде устройств, действующих на одном из следующих принципов: а) поплавкового типа, в которых поплавки, периодически поднимаемые и опускаемые волной, вращают при помощи тяг и рычагов рабочие валы; б) в виде сосудов, в которых колебание да-

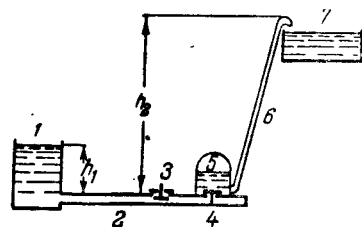


Рис. 5-17. Схема гидравлического тарана.

1—источник; 2—питательная труба; 3—ударный отбойный клапан; 4—напорный нагнетательный клапан; 5—воздушный колектор; 6—напорная труба; 7—бак.

ческими турбинами и электрическими генераторами. Предложены приливные гидроэлектростанции: а) с односторонним циклом работы (пропуск воды через турбины только из моря в залив или только в море из залива); б) с двусторонним циклом работы (пропуск воды через турбины в обоих направлениях); в) одnobассейновые — с прерывистой работой турбин (перерыв на время наполнения бассейна); г) многобассейновые — с непрерывной работой. Приливные гидроэлектростанции являются наиболее экономичными при работе в системе с тепловыми станциями. В Англии был разработан, но не осуществлен проект приливной гидроэлектростанции на 800 тыс. квт. В СССР в настоящее время ведутся работы по сооружению приливной ГЭС на Белом море.

Гидравлический таран — водоподъемная машина, использующая эффект гидравлического удара в трубах (рис. 5-17). Явление гидравлического удара было известно еще в XVIII в., но лишь в трудах Н. Е. Жуковского, относящихся к 1898—1907 гг., были установлены условия работы тарана и указаны методы рациональной его конструкции. Очень важными преимуществами гидравлического тарана являются простота устройства, дешевизна, отсутствие надобности в каком-либо виде топлива и малые эксплуатационные расходы. Гидравлический таран для своего действия должен иметь достаточно воды и небольшой начальный напор, чем, вообще говоря, располагают почти повсеместно.

гии на значительные расстояния. Началось строительство электрических станций и сетей, зародилась и стала развиваться электроэнергетика.

Развитие электроэнергетики и электромашиностроения, разработка различных электрических аппаратов и устройств, улучшение качества и свойств электротехнических материалов, углубление научных исследований в области теории электричества и магнетизма — все это привело к тому, что в 70—80-годах XIX в. электротехника превратилась в самостоятельную, быстро шагающую вперед отрасль техники.

Развитие
электрического
освещения и его
влияние
на электротехнику
в целом

Чем было вызвано такое интенсивное развитие электрического освещения?

В течение первой половины XIX в. господствующее положение занимало газовое освещение, имевшее существенные преимущества перед освещением лампами с жидким горючим. Эти преимущества заключались в централизации снабжения установок светильным газом, сравнительной дешевизне этого горючего, простоте газовых горелок, простоте обслуживания газового освещения. Но по мере развития капиталистического производства, роста городов, строительства крупных производственных зданий, гостиниц, магазинов, зрелищных помещений и т. п. газовое освещение начинало постепенно все менее удовлетворять требованиям практики. Оно небезопасно в пожарном отношении, вредно для здоровья, сила света каждой отдельной горелки очень невелика. Для таких предприятий, как текстильные и швейные фабрики, типографии, деревообделочные цехи и т. п., газовое освещение являлось постоянной потенциальной угрозой пожаров. То же можно сказать об освещении театров и других помещений общественного пользования. Недостатки, присущие газовому освещению, стали особенно сказываться в условиях развития промышленности и строительства крупных предприятий с большим числом рабочих, занятых на производстве по 12—14 ч в сутки.

Поэтому создание более совершенных источников света явилось одной из насущных задач производства. Электрическое освещение не имело многих недостатков, которые

были свойственны газовому. Это и заставило многих ученых и изобретателей стать на путь построения электрических источников света.

Конструирование источников электрического освещения шло в основном по двум направлениям: использование явления электрической дуги (дуговые лампы) и явления накаливания проволоки током (лампы накаливания).

При разработке конструкций дуговых ламп наиболее сложной проблемой явилось регулирование расстояния между электродами. Поэтому вся история дуговых ламп представляет собой по существу развитие конструкций различного рода регуляторов.

Первая дуговая лампа (Ж. Б. Л. Фуко, 1844 г.) имела ручное регулирование; такие лампы были очень неудобны для пользования и применялись лишь в тех случаях, когда требовалось непродолжительное по времени, но интенсивное освещение (например, освещение предметного стекла в микроскопе, подсветка на театральной сцене). Неудобство дуговых ламп с ручным регулированием ускорило разработку автоматически действующих регуляторов. Наиболее простыми регуляторами были электромагнитные¹. Как уже отмечалось (см. гл. 4), электромагнитные регуляторы представляют интерес и в том отношении, что они являлись по существу первыми электроавтоматическими приборами. Дуговые лампы с электромагнитными регуляторами получили некоторое применение на маяках, для освещения гаваней и других открытых пространств, а также для освещения больших помещений.

Для питания дуговых ламп пользовались гальваническими батареями или электрическими генераторами (например, машина «Альянс»); развитие и совершенствование электрических генераторов в то время были обусловлены главным образом ростом установок электрического освещения. Вот почему электрическое освещение явилось одним из важнейших стимулов для развития электрических машин и электрохимических источников тока. Однако исследования в области электрического освещения, так же как и в других областях энергетических применений элект-

¹ Значительное распространение получили лампы с регуляторами комбинированного (электромагнитного и механического) действия. Такой регулятор, в частности, имела дуговая лампа русского изобретателя А. И. Шпаковского, успешно использованная для освещения большой площади перед Лефортовским дворцом во время коронационных торжеств в Москве в 1856 г.

тричества, в значительной мере сдерживались отсутствием дешевого, удобного в эксплуатации и надежного генератора электрического тока. До создания такого генератора электрическое освещение не могло получить широкого распространения.

Что касается ламп накаливания, то они до 70-х годов XIX в. не получили сколько-нибудь заметного применения вследствие своего несовершенства. Основными проблемами здесь были изыскание дешевого и долговечного тела накала и методов получения вакуума. Эксперименты показали возможность использования в качестве тел накала не только платины (что было очень дорого), но и угольных стержней (инж. Жобар, 1838 г.), обугленного бамбукового волокна (Г. Гебель, 1854 г.), обугленных полосок бристольского картона или толстой бумаги (Д. У. Свон, 1860 г.).

Появление экономичных и пригодных для практики электромашинных генераторов и успехи техники электрического освещения создали в начале 70-х годов условия для более интенсивного развития электротехники. Значение электрического освещения в рассматриваемый период определяется тем, что, как уже указывалось, оно явилось первым массовым энергетическим применением электричества. Создание промышленного генератора электрического тока стимулировало усилия ученых и инженеров, работавших в области электрического освещения. Необходимо было так усовершенствовать конструкции самих источников света, чтобы они были простыми и надежными, доступными для широкого потребления.

Наиболее успешное решение этой проблемы было связано с изобретением «электрической свечи» (П. Н. Яблочков, 1876 г.) — дуговой лампы без регулятора. Создание такого простого и удобного источника света сыграло исключительно важную роль не только в переходе от опытов электрического освещения к его широкому внедрению в практику, но и в развитии электротехники вообще.

В отличие от предшествующих конструкций дуговых ламп с соосным горизонтальным или вертикальным расположением электродов угли в электрической свече Яблочкова были установлены параллельно друг другу и разделялись тонким изолирующим слоем каолина (рис. 6-1). Именно вследствие такого расположения электродов расстояние между их концами в процессе работы лампы не изменялось и, следовательно, не было необходимости в регуляторе. Высота электродов по мере их сгорания посте-

пенно уменьшалась, и они выгорали подобно свече. Отсюда и произошло название дуговой лампы Яблочкова «электрическая свеча», под которым она и обошла почти весь мир.

Одна электрическая свеча могла гореть около 2 ч; при установке нескольких свечей в специальном фонаре, оборудованном переключателем для включения очередной свечи вместо перегоревшей, можно было обеспечить бесперебойное освещение в течение более длительного времени.

Изобретение электрической свечи способствовало внедрению переменного тока в практику. В течение всего предшествующего периода применения электричества базировались на постоянном токе (телеграфия, гальванотехника, минное дело). Дуговые электрические лампы с регуляторами также питались постоянным током. При этом выгорание углей происходило неравномерно (положительный уголь сгорал быстрее отрицательного) и приходилось брать угли неодинаковых диаметров: положительный электрод должен был иметь больший диаметр.

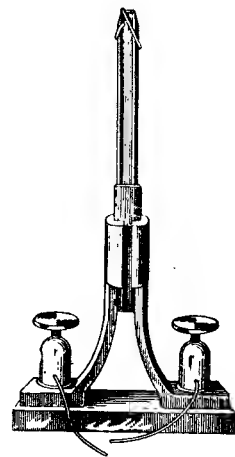


Рис. 6-1. Электрическая свеча Яблочкова

В процессе экспериментов с электрической свечой Яблочков установил, что для ее питания лучше применять переменный ток, в результате чего отпадает необходимость в установке электродов разных диаметров и получается вполне устойчивая дуга. В короткий срок осветительные установки по системе Яблочкова были переведены на питание переменным током. В связи с этим заметно возрос спрос на генераторы однофазного переменного тока, которые раньше не находили практического применения. О значении электрической свечи в расширении производства электрических генераторов переменного тока можно судить на основании следующего примера: если до появления электрической свечи завод Грамма выпускал в течение 1870—1875 гг. по несколько десятков машин за год, то за 1876 г. выпуск генераторов возрос почти до 1 000 шт. Заводы изготавливали электрические генераторы, специально предназначенные для установок электрического освещения,

и мощность машин обозначалась по числу питаемых электрических свечей.

Значительному развитию электротехники способствовала также и разработка Яблочковым нескольких весьма эффективных систем «дробления электрической энергии», обеспечивавших возможность включения в цепь, питаемую одним генератором, нескольких дуговых ламп. Хотя электрическая свеча и не имела регулятора, тем не менее осуществить «дробление электрического света» в установках со свечами было весьма трудно. При последовательном включении двух-трех электрических свечей можно было добиться их одновременного спокойного горения; при большем же числе последовательно включенных электрических свечей режим работы становился неустойчивым, что приводило к потуханию одной из свечей, а вслед за нею и всех других. Если свечи включали в цепь параллельно, то зажигалась только та из параллельно включенных свечей, сопротивление которой было наименьшим. После выгорания этой свечи загоралась следующая, сопротивление которой было меньшим, чем у остальных, и т. д. Таким образом, при параллельном включении свечей можно было иметь в любой момент только одну горящую электрическую свечу.

Среди способов «дробления электрической энергии», предложенных Яблочковым, наибольший интерес представляют два, получившие практическое применение: секционирование обмотки якоря генератора (в результате чего получалось несколько независимых цепей, в которые включались свечи) и применение индукционных катушек (рис. 6-2). Первичные обмотки катушек включались после-

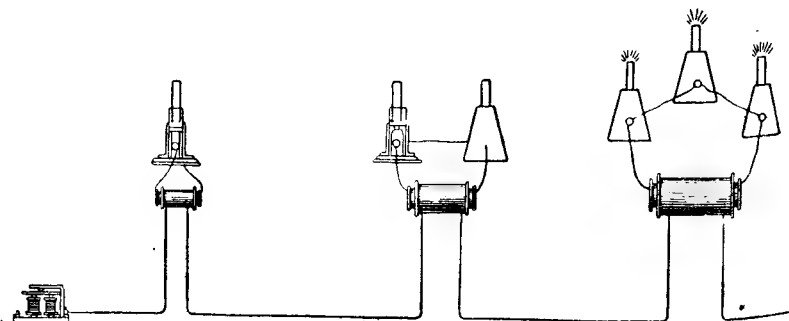


Рис. 6-2. Схема разделения электрической энергии посредством индукционных катушек.

довательно в цепь, а во вторичную обмотку в зависимости от ее параметров могли подключаться одна, две и более свечей. Если первичная цепь питалась постоянным током, то предусматривалось включение в нее специального пре-

рывателя для наведения э. д. с. во вторичных обмотках катушек.

Из схемы, приведенной на рис. 6-2, видно, что индукционная катушка работает в режиме трансформатора, что являлось одним из этапов на пути создания трансформатора. Ука-

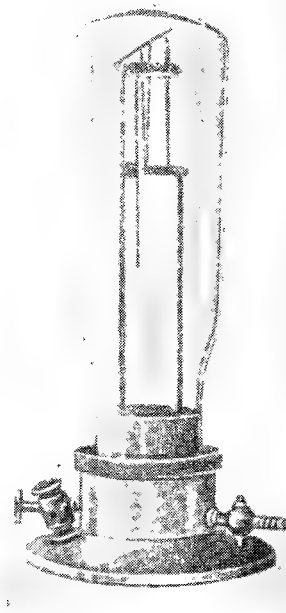


Рис. 6-3. Электрическая лампа накаливания А. Н. Лодыгина (1873 — 1875 гг.).

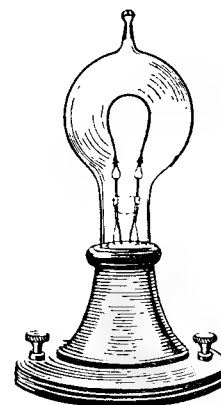


Рис. 6-4. Электрическая лампа накаливания Эдисона (1879 г.).

занная схема представляет большой интерес также и в том отношении, что в ней впервые получила свое оформление электрическая сеть с ее основными элементами. Но значение электрической свечи для развития электротехники этим не исчерпывается. Изобретение дешевого приемника электрической энергии, доступного для широкого потребителя, со всей очевидностью вызвало необходимость решения еще одной важнейшей электротехнической проблемы — централизации производства электрической энергии и ее распределения.

Дальнейший прогресс электрического освещения был связан с изобретением лампы накаливания, которая была гораздо более удобным источником света, имеющим более высокие экономические и световые показатели (в особенности после замены угольных нитей вольфрамовыми). Создание вакуумной лампы накаливания промышленного типа явилось результатом труда ученых и инженеров разных стран.

70-е годы XIX в. характеризуются разработкой эффективных методов увеличения долговечности ламп накаливания либо за счет установления нескольких угольных стерженьков, располагаемых таким образом, чтобы при сгорании одного автоматически включался следующий (А. Н. Лодыгин, рис. 6-3), либо за счет применения более высококачественных материалов для тела накала и улучшения откачки воздуха из баллона (Т. А. Эдисон и др., рис. 6-4). В конце 70-х годов разрабатываются все основные виды электроустановочных материалов, необходимых для устройства и монтажа освещения лампами накаливания (Эдисон), а в 90-х годах были запатентованы первые лампы с вольфрамовой нитью (Лодыгин). С этого времени начинаются быстрое развитие электрического освещения, все более расширяющееся массовое производство ламп накаливания, вызвавшее дальнейшее развитие электромашиностроительной промышленности, электроприборостроения, электроизоляционной техники и совершенствование способов производства и распределения электрической энергии.

Развитие кабельной и электроизоляционной техники

Совершенствование электроизоляционных материалов непосредственно связано с развитием практических применений электричества. К 70-м годам XIX в. в соответствии с требованиями практики закладываются основы новых отраслей техники — кабельной и электроизоляционной.

Начальный период развития кабельной техники был тесно связан с работами по минной электротехнике и электромагнитному телеграфу. Первый подводный электрический кабель (П. Л. Шиллинг, 1811 г.) представлял собой тонкую проволоку, покрытую двумя слоями изоляции, шелком и пенькой, причем первый слой (шелк) пропитывался специальным смолистым составом, на который затем навивалась пенька, и все снова пропитывалось тем же смолистым составом.

Первые подземные телеграфные кабели (П. Л. Шиллинг, Б. С. Якоби и др.) изготавливались примерно таким же способом: провода изолировались одним или двумя слоями хлопчатобумажной пряжи с последующей пропиткой ее специальными составами (например, из воска, сала и канифоли). Защитной оболочкой служили стеклянные трубки, соединенные резиновыми муфтами, или стальные гильзы; в отдельных случаях стеклянные трубки закладывались в деревянные желоба (при подземной прокладке).

В начале 40-х годов XIX в. в связи с необходимостью изготовления большого количества изолированных проводников создаются специальные машины для обвивки проводов пряжей¹.

В эти же годы в качестве изоляционных материалов начинают применяться резина и гуттаперча. Каучук был известен уже давно, но его способность сильно изменять свойства при незначительных изменениях температуры препятствовала применению его для целей изоляции. Только после внедрения вулканизации (Гудьир, 1839 г.) каучук приобрел те свойства, которыми обладает материал, хорошо известный под названием резины. Для изолирования подводных телеграфных линий широкое применение получила гуттаперча, которая в воде хорошо сохраняла свои свойства. В начале 50-х годов впервые был получен эбонит, используемый при изготовлении различных электрических приборов и устройств.

Быстрое увеличение протяженности подводных и подземных телеграфных линий предъявляло все более серьезные требования к улучшению качества изоляции. Существенным шагом на пути решения этой проблемы явилось изобретение пресса (1848 г.) для бесшовного наложения резиновой и гуттаперчевой изоляции на медные жилы. Но еще более важно было создать специальные покровные материалы, которые усиливали бы механическую прочность изоляции (в частности, резины и гуттаперчи) при сохранении ее гибкости и эластичности. Эта задача была решена построением свинцового пресса (1879 г.), посредством которого изолированный провод покрывался бесшовной свинцовой оболочкой. В 90-х годах все большее применение для силовых кабелей начинает получать многослойная пропитанная маслом бумажная изоляция.

¹ Такие машины, например, были установлены в первой электротехнической мастерской, созданной в России под руководством Б. С. Якоби для обслуживания гальванических команд русской армии.

Развитие электрических машин и аппаратов вызвало необходимость в разработке специальных электроизоляционных материалов, способных выдерживать значительные температуры. С целью повышения термостойкости изоляции создаются специальные пропиточные составы и покрытия, а также композиционные изолирующие материалы. Для изоляции пластин коллектора начинает применяться слюда; в начале 90-х годов на основе слюды создаются новые материалы: миканит, микалента, микафолит, нашедшие широкое применение для изоляции в электрических машинах и приборах.

Успехи химии в конце XIX—начале XX вв. приводят к созданию различных синтетических высокомолекулярных соединений, на основе которых разрабатываются новые электроизоляционные материалы, которые наряду с хорошими электрическими свойствами обладают высокой нагревостойкостью и влагостойкостью.

Важнейшие теоретические исследования в области электромагнетизма

Открытия в области электричества и магнетизма, сделанные в первой половине XIX в., в особенности исследования явлений электродинамики и электромагнитной индукции, а также широкие практические применения этих явлений в течение 70—90-х годов явились предпосылками к важным научным обобщениям, в частности к созданию электромагнитной теории Максвелла.

В период разработки Дж. К. Максвеллом электромагнитной теории естественные науки находились в идейном подчинении образцу, созданному И. Ньютоном в труде «Математические принципы натуральной философии». Все рассматриваемые явления характеризовались законами механики, которые позволяют предсказать движение, если известны силы, либо определить силы, вызвавшие известное движение. Движение всех мировых масс получало простое объяснение при предположении, что между ними действует притяжение, прямо пропорциональное произведению этих масс и обратно пропорциональное квадрату расстояния.

Учение об электричестве и магнетизме до середины XIX в. развивалось в точном следовании учению о тяготении. Ш. О. Кулон, определив на основе экспериментов силы взаимодействия между электрическими или магнитными массами, выразил их величину математической формулой (закон Кулона), аналогичной выражению для силы всемирного тяготения. Однако и в законе Ньютона и в законе Кулона не получили объяснения сам механизм передачи действующих сил. Закон Био-Савара—Лапласа, устанавливавший величину силы взаимодействия между магнитным полюсом и током, давал аналогичное выражение для силы взаимодействия; такое же выражение было дано А. М. Ампером для взаимодействий между токами. Во всех этих случаях явления рассматривались с позиций дальнего действия, господствовавших в науке около 150 лет.

Характерными для того времени являются также представления о существовании различных гипотетических невесомых жидкостей, та-

ких, как теплород, светотвор, положительная и отрицательная электрические жидкости и т. п.

Этим воззрениям, ставшим классическими, но застывшим в своих формах, М. Фарадей впервые противопоставил новые взгляды, противоположные представлениям о дальнем действии. В то время как все физики до Фарадея и многие из его современников существо электромагнитных явлений видели в электрических или магнитных зарядах, Фарадей центр своего внимания перенес на среду, пространство, разделяющее проводники и магнитные полюсы, находящиеся во взаимодействии. По представлениям Фарадея, это пространство пронизано вполне реальными потоками электрических и магнитных сил, различными в разных средах, т. е. промежуточная среда между взаимодействующими телами оказывает на эти потоки определенное влияние. На основе своих представлений о силовых линиях, реально существующих в среде, окружающей проводники с током, Фарадею удалось наглядно объяснить явление электромагнитной индукции.

Практические открытия Фарадея широко использовались, но на сущность его воззрений долгое время никто не обращал внимания. К тому же Фарадей не пользовался в своих трудах математическим аппаратом, а потому многие его мысли казались современникам недостаточно обоснованными, так как они аргументировались лишь логическими выводами из данных опыта. Взяв из арсенала достижений Фарадея все, что представляло интерес для практики, современники остались равнодушными к его передовым воззрениям.

Заслуга Дж. К. Максвелла состоит в том, что, используя громадный экспериментальный материал, накопленный Фарадеем за многие годы исследований, он обобщил и развил прогрессивные идеи Фарадея, придав стройную математическую форму законам электромагнитных процессов.

Уже в первых своих научных работах «О фарадеевых силовых линиях» и «О физических силовых линиях», опубликованных в 1861—1864 гг., Максвелл выступает в защиту воззрений Фарадея об активной роли среды, окружающей наэлектризованные и магнитные тела, математически интерпретирует и обобщает законы, которым подчинены электромагнитные явления. Многолетние теоретические исследования Максвелла в области электричества и магнетизма нашли свое выражение и наиболее полное обобщение в его фундаментальном сочинении «Трактат об электричестве и магнетизме», изданном в 1873 г. В этом труде Максвелл изложил основы разработанной им теории поля, являющейся краеугольным камнем современного учения об электромагнетизме. Важнейшие результаты своих исследований Максвелл сформулировал в виде известных уравнений (уравнения Максвелла), которые связывают изменения основных величин, характеризующих электрические и магнитные поля.

Максвелл обобщил закон электромагнитной индукции, распространив его на любой контур в любой среде. Он ввел понятие об электрическом смещении и токах смещения, возникающих при изменении электрического поля. Максвелл утверждал, что там, где кончаются проводники, электрические токи не прекращаются, а продолжают в виде токов смещения, причем эти токи смещения так же возбуждают магнитное поле, как и токи проводимости. Это привело его к установлению принципа замкнутости тока.

Одним из важнейших выводов Максвелла является утверждение о том, что магнитное и электрическое поля тесно связаны между собой и изменение одного из них вызывает появление другого. Максвелл до-

казал, что изменение электрического состояния в какой-либо точке поля сопровождается постепенным распространением этого переменного состояния или возмущения со скоростью света на соседние точки (наподобие волны). Исследования показали, что скорость распространения подобных электромагнитных возмущений действительно совпадает со скоростью света. На основе этого Максвелл приходит к выводу, что свет состоит из поперечных колебаний той же среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений. Этот вывод положен в основу электромагнитной теории света, разработанной Максвеллом и являющейся одним из выдающихся теоретических обобщений естествознания.

Как следствие из теоретических положений Максвелла вытекало, что существует световое давление, величина которого была Максвеллом предсказана.

Максвелл не дожидаясь торжества своих глубоких научных идей и обобщений. Он сам еще не мог во всем объеме представить значение всего того, что содержалось в его «Трактате об электричестве и магнетизме», и того, что из него вытекало. Позднее немецкий физик Г. Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн, а русский физик П. Н. Лебедев открыл световое давление и определил из опытов его величину, совпадавшую со значениями, вычисленными по теории Максвелла.

Важное значение в развитии представлений о движении энергии имели работы проф. Н. А. Умова, среди которых особого внимания заслуживает его докторская диссертация «Уравнения движения энергии в телах» (1874 г.). В этой работе Н. А. Умов связывает кинетическую энергию с движущейся частицей и утверждает в науке понятие о движении энергии. В связи с этим им вводятся понятия о плотности энергии и скорости ее движения и даются дифференциальные уравнения движения энергии в твердых телах постоянной упругости и жидкостях. Идеи Н. А. Умова получили дальнейшее развитие, в частности, в трудах английского физика Дж. Г. Пойнтинга применительно к электромагнитному полю (1884 г.).

В указанный период были проведены отдельные исследования, имевшие чрезвычайно большое значение для практической электротехники. Среди этих работ следует особо отметить исследования магнитных свойств стали и установление закона для магнитной цепи.

6-2. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ НАЧАВШЕГОСЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Развитие электротехники в 70-х годах прошлого столетия подготовило почву для перехода к централизованному производству электроэнергии. В 80-х годах осуществление такого перехода стало исторически неизбежным. Действительно, дальнейшее внедрение электрического освещения и других применений электричества в практику не было бы экономически оправданным, если бы каждый потребитель или ограниченная группа мелких потребителей снабжалась от специально для них устроенных генерирующих установок. В частности, электрическое освещение при этих

условиях не могло бы конкурировать с дешевым газовым освещением.

Но не только дороговизна электрического освещения являлась недостатком системы децентрализованного производства электроэнергии. Развивавшаяся капиталистическая промышленность, концентрация и централизация промышленных предприятий требовали перехода от изолированных небольших генераторных установок к централизованному производству и распределению электроэнергии. Следовательно, к концу 70-х годов XIX в. были созданы технические и экономические предпосылки к централизованному промышленному производству электрической энергии и превращению электрической энергии в товар.

Таким образом, идея централизованного производства электроэнергии логически вытекала из самых насущных потребностей промышленности и была подготовлена предшествующим развитием электротехники. В связи с этим уже в конце 70-х годов многие электрики в разных странах все более и более настойчиво начинают ставить вопрос об индустриальных методах производства электроэнергии. В частности, на необходимость централизованного производства электроэнергии указывал в 1879 г. П. Н. Яблочков в своей публичной лекции «Об электрическом освещении». Он подчеркнул необходимость такой же организации снабжения электрической энергией отдельных потребителей, как это имело место при снабжении водой и газом. Так возникла идея «заводов» или станций, вырабатывающих большие количества электроэнергии и продающих ее потребителям.

Однако радикальное решение проблемы централизованного производства и распределения электрической энергии могло быть осуществлено только при условии внедрения экономичных способов передачи энергии на значительные расстояния. Решение этой задачи становилось все более необходимым по мере увеличения числа и мощности потребителей, которые не всегда оказывались сосредоточенными в непосредственной близости от электростанций.

**Механические
способы передачи
энергии**

Строго говоря, проблема передачи энергии на расстояние возникла много раньше того времени, когда были построены первые электростанции. Эта проблема стала особенно актуальной с возникновением крупных промышленных предприятий, на которых нужно было приводить в действие ряд исполнительных механизмов от одного общего для них двигателя. Тогда, правда, еще не было необходи-

мости вести передачу энергии на километры, но иногда приходилось осуществлять передачи на несколько сотен метров. Раньше всего возникли способы механической передачи посредством штанг, туг и канатов, а затем получили распространение передачи энергии между валами с развитой системой приводных ремней и канатов (передачи с гибкой связью). Следует отметить, что такая передача (трансмиссионная) много лет применялась на практике и еще не вполне отмерла теперь. Проволочный канат позволял достигнуть дальности передачи до 120 м, а передача канатом с промежуточными блоками (через каждые 100 м) могла производиться на расстоянии до 5 км. Средний к. п. д. канатной передачи с тремя ступенями составлял примерно 45—50%.

В 40-х годах прошлого столетия для приведения в действие подъемных механизмов стали использовать передачу энергии с помощью воды, распределявшейся под давлением по трубам (система Армстронга). Дальность такой гидропередачи достигала уже 20 км при максимальном давлении 75 ат и мощности до 300 л. с. В 1880 г. в Женеве была построена установка для перекачки воды из Женевского озера в водонапорные башни, откуда она распределялась по всему городу. Создавались различные двигатели, работавшие от такого водопровода. Установки гидропередачи сооружались в городах (Париж, Цюрих и др.), гаванях (Гамбург) и т. д. Самой крупной установкой такого рода была Лондонская, которая начала действовать в 1884 г., а к 1894 г. общая протяженность ее трубопроводов достигала 112 км. Коэффициент полезного действия гидравлической передачи энергии на 5 км составлял примерно 50%.

Делались многочисленные попытки использовать для передачи энергии сжатый воздух. Впервые пневматическая передача была осуществлена в 1845 г. при проходке туннеля. Затем эта система получила применение в угольных шахтах (вследствие безопасности в пожарном отношении). В Париже и Вене в 1870 г. пневматическая передача энергии была использована для привода 8000 часовых механизмов (импульсы давались через каждые 20 сек). Позднее в Париже была устроена центральная станция на 2000 л. с., а сеть воздухопроводов достигла протяженности в 60 км. В 1891 г. на набережной Сены была построена новая станция сжатого воздуха на 24000 л. с., работавшая до конца 90-х годов. Пневматическая система передачи энергии сжатым воздухом широко рекламировалась капиталистически-

ми фирмами, которые утверждали, что она экономичнее других, в том числе и электрической. Сила капиталистической рекламы может быть иллюстрирована тем фактом, что в 1891 г. установка пневматической передачи была построена в Оффенбахе, находящемся в 10 км от Франкфурга-на-Майне, где в это время уже работала с высокими экономическими показателями электропередача трехфазным током Лауфен — Франкфурт.

Совершенно ясно, что ни одна из перечисленных выше систем передачи не могла удовлетворительно решить проблему передачи энергии на большие расстояния. Наиболее гибкой, экономичной и удобной могла быть только электрическая передача энергии. Затем состояла в том, чтобы найти способы увеличения дальности передачи электрической энергии.

Первые опыты передачи электроэнергии постоянным током

Первые опыты передачи электрической энергии на расстояние относятся к самому началу 70-х годов.

В 1873 г. на Венской международной выставке французский электрик И. Фонтен демонстрировал обратимость электрических машин. Одна из машин Грамма работала в режиме генератора, а такая же вторая — в режиме двигателя. Последняя машина приводила в действие водяной насос искусственного водопада. Желая несколько снизить мощность двигателя (чтобы вода не выбивалась за пределы бассейна), Фонтен решил увеличить сопротивление проводов, соединявших две машины. Для этого он включил между машинами барабан с кабелем длиной несколько больше 1 км. Так была показана возможность передачи электроэнергии на более или менее значительное по представлениям того времени расстояние. Вместе с тем сам Фонтен не был убежден в экономической целесообразности электропередачи, так как при включении соединительного кабеля он получил значительное снижение мощности двигателя, что свидетельствовало о больших потерях энергии в кабеле.

Из закона Джоуля-Ленца, известно, что потери в проводах

$$\Delta P = I^2 r,$$

где I — ток в проводе;

r — сопротивление провода.

Это выражение можно привести к следующему виду:

$$\Delta P = \frac{P^2 r l}{U^2 q}, \text{ так как } I = \frac{P}{U}, \text{ а } r = \rho \frac{l}{q},$$

где P — мощность линии;

ρ — удельное сопротивление провода;

l — длина провода;

q — сечение провода;

U — напряжение.

Если полагать, что требуется передать определенную мощность P на расстояние l , то из приведенной формулы видно, что потери в линии зависят от напряжения, удельного сопротивления провода и его сечения. Снижение удельного сопротивления проводов практически неосуществимо, так как медь, ставшая основным материалом для изготовления проводов, имеет предельно малое удельное сопротивление. Следовательно, имелись только два пути для снижения потерь в линии: увеличение сечения проводов или повышение напряжения.

В 70-х годах был исследован первый путь, так как увеличение сечения проводников представлялось мероприятием, по-видимому, более естественным и технически легче осуществимым по сравнению с повышением напряжения. В 1874 г. русский военный инженер Ф. А. Пироцкий пришел к выводу об экономической целесообразности производства электрической энергии в тех местах, где она может быть дешево получена благодаря наличию топлива или гидравлической энергии, и передачи ее по линии к более или менее отдаленному месту потребления. В том же году он приступил к опытам передачи энергии на артиллерийском полигоне Волкова поля (около Петербурга), используя электрическую машину Грамма. Дальность передачи в опытах Пироцкого составляла сначала более 200 м, а затем была увеличена примерно до 1 км.

Для уменьшения потерь в линии Пироцкий предлагал использовать в качестве проводников железнодорожные рельсы, сечение которых более чем в 600 раз превышало сечение обыкновенного телеграфного провода. Стремясь проверить свои выводы, он в конце 1875 г. произвел опыты передачи электроэнергии по рельсам бездействовавшей ветки Сестрорецкой железной дороги длиной около 3,5 км. Оба рельса изолировались от земли, один из них служил прямым, второй — обратным проводом. Электрический ток шел от небольшого генератора Грамма к электродвигателю, удаленному на расстояние около 1 км.

Необходимо отметить, что Пироцкий был не единственным электротехником, ставшим на путь увеличения сечения проводов. Так, например, В. Сименс, посетив в 1876 г.

Ниагарский водопад, сумел правильно оценить энергетические возможности его использования, но утверждал, что для передачи энергии водопада на расстояние 50 км требуется проводник диаметром 75 мм. Подобные выводы являлись наглядным выражением уровня познаний в области электротехники в 70-х годах XIX в.

Несмотря на нерациональность практического направления, избранного Пироцким, его опыты привлекли внимание к вопросам электропередачи вообще, вызвали ряд новых исследований, приведших к выявлению правильного пути для решения этой проблемы. Предложение Пироцкого об использовании железнодорожных рельсов для передачи электрической энергии на расстояние нашло свое применение уже при разработке первых проектов городских электрических железных дорог.

Другой путь решения проблемы передачи электрической энергии, основанный на повышении напряжения линии передачи, — путь прогрессивный — был избран французским академиком М. Депре и профессором физики Петербургского лесного института Д. А. Лачиновым.

В марте 1880 г. в протоколах Парижской академии наук был опубликован доклад М. Депре «О коэффициенте полезного действия электрических двигателей и об измерении количества энергии в электрической цепи», в котором он математически доказывал, что к. п. д. установки, состоящей из электродвигателя и линии передачи, не зависит от сопротивления самой линии. Такой вывод показался Депре парадоксальным, так как ему вначале не удалось установить, что увеличение сопротивления линии не влияет на эффективность электропередачи только при определенном условии, а именно при увеличении напряжения передачи.

Эти условия впервые были указаны проф. Д. А. Лачиновым в статье «Электромеханическая работа», опубликованной в июне 1880 г. в первом номере журнала «Электричество». На основе математических выкладок Лачинов показал, что в электропередаче «полезное действие не зависит от расстояния» лишь при условии увеличения скорости вращения генератора (т. е. при повышении напряжения в линии, так как э. д. с., развиваемая генератором, пропорциональна скорости — *Авт.*). Лачинов также установил количественное соотношение между параметрами линии передачи, доказав, что для сохранения к. п. д. передачи при увеличении сопротивления линии в n раз необходимо

увеличить скорость вращения генератора в $\sqrt{n}$ раз: «Если, например, — писал Лачинов, — увеличим R в 100 раз, то при передаче того же числа лошадиных сил скорость будет десятикратная». К подобным же выводам пришел спустя более года и М. Депре.

Большая заслуга в практическом решении вопросов передачи энергии постоянным током на значительные расстояния принадлежит М. Депре. Исходя из ранее разработанных принципов, Депре в 1882 г. строит первую линию электропередачи Мисбах—Мюнхен протяженностью 57 км. На одном конце опытной линии в Мисбахе была установлена паровая машина, приводившая в действие генератор постоянного тока мощностью 3 л. с., дававший ток напряжением 1,5—2 кв. Энергия передавалась по стальным телеграфным проводам диаметром 4,5 мм на территорию выставки в Мюнхене, где была установлена такая же машина, работавшая в режиме электродвигателя и приводившая в действие насос для искусственного водопада. Эта электропередача работала с перебоями (4 дня из 12) по причине разных неисправностей в сети; ее к. п. д. не превосходил 0,25. Хотя этот первый опыт и не дал достаточно благоприятных технических результатов, его значение нельзя было недооценивать: электропередача Мисбах—Мюнхен явилась отправным пунктом для дальнейших работ по развитию методов и средств передачи энергии на расстояние. В то время к вопросу электропередачи подходили чисто эмпирически: закономерности и соотношения параметров еще не были установлены; полагали, что максимальный к. п. д. не может превосходить 50%.

Некоторые электротехники, современники Депре, при давали большое значение его опытам, в то время как некоторые другие, например, видный английский инженер Вильям Прис, выступали с утверждением о полной неудаче опытов Депре. Находились специалисты, которые вообще оспаривали возможность достижения даже такого к. п. д., какой был при опытах Депре. Поэтому было решено повторить опыты Депре в несколько иных условиях, но с сохранением основного оборудования передачи Мисбах—Мюнхен. Для этого обе машины были поставлены рядом в здании Северного вокзала в Париже, а провод, соединяющий машины, имел длину 15 км и был того же сечения, что и в передаче Мисбах—Мюнхен. Измерения показали, что к. п. д. достигает 0,48. Так как некоторые специалисты пытались опорочить и эти результаты, пришлось

заново поставить все опыты в реальных условиях; так родилась вторая опытная передача (1883 г.) из Визилья в Гренобль.

Высокую оценку работам Депре дали Маркс и Энгельс, следившие за развитием его экспериментов. Уже в этой начальной стадии работы основоположники научного социализма усмотрели не только зародыш будущего освоения промышленности «почти от всех местных границ» и возможность использования даже самых отдаленных гидравлических ресурсов, но и указали на важные социальные последствия решения задачи передачи энергии. В письме к Бернштейну (1883 г.) Энгельс писал в связи с опытами Депре о том, что благодаря этому производительные силы настолько вырастут, что управление ими будет все более и более не под силу буржуазии.

Линия Визиль-Гренобль представляла собой своего рода контрольную установку, осуществленную Депре в 1883 г. на участке протяженностью 14 км. В Визиле можно было использовать энергию водопада для приведения в действие водяной турбины; генератор постоянного тока имел мощность 11,5 л. с. Передача осуществлялась током высокого напряжения, причем к. п. д. был равен 0,62. Энергия, переданная в Гренобль (примерно 7 л. с.), была использована для вращения нескольких электродвигателей для печатных машин.

В 1885 г. были произведены опыты еще в большем масштабе — на расстоянии 56 км между Крейлем и Парижем. В качестве генераторов постоянного тока высокого напряжения были использованы специально построенные машины, дававшие напряжение до 6 кв. Вес такой машины был около 70 т, мощность — около 50 л. с. Измерения показали, что был достигнут к. п. д. около 0,45.

Через некоторое время Фонтен показал, что такой результат вполне достижим при последовательном соединении четырех электрических машин соответственно меньшего напряжения, а следовательно, и веса. В условиях, сходных с электропередачами Крейль — Париж, Фонтен получил к. п. д., равный 0,82, и этим окончательно опроверг укоренившееся мнение о том, будто максимальный к. п. д. при электропередачах не может превосходить 0,5. Идея Фонтена о последовательном включении генераторовшла затем свое развитие в электропередаче по системе Тюри (см. гл. 12).

Наряду с описанными опытными установками для передачи электрической энергии на расстояние в эти годы были осуществлены единичные установки передачи электроэнергии для промышленного использования. Так, например, в Швейцарии завод Эрликон осуществил электропередачу мощностью 50 л. с. на расстояние 7,4 км между Золотурном и Криштеденом с к. п. д. 0,75, а также некоторые другие электропередачи.

Тем не менее попытки решить проблему электропередачи посредством постоянного тока, осуществленные в 80-х годах, следует считать неудачными. При этом важно подчеркнуть возникшее существенное противоречие. С одной стороны, практика проектирования и производства электрических машин и аппаратов постоянного тока получила уже значительное развитие, двигатели постоянного тока обладали хорошими рабочими характеристиками, отвечавшими большинству требований промышленности. С этой точки зрения не было серьезных препятствий к тому, чтобы приступить к широкой электрификации силового аппарата промышленности. Но, с другой стороны, широкая электрификация промышленности может быть осуществлена в больших масштабах только при централизованном производстве электроэнергии, а следовательно, только при обеспечении передачи электроэнергии на значительные расстояния.

Однако для передачи энергии требовалось получать высокие напряжения, а технические возможности того времени не позволяли строить генераторы постоянного тока высокого напряжения; примером этого могут служить машины Дебре, которые часто выходили из строя из-за порчи изоляции. Вообще говоря, в любом случае передача энергии при генераторном напряжении ограничена сравнительно низкими пределами. Кроме того, электроэнергию постоянного тока высокого напряжения не представлялось возможным легко использовать у потребителя: нужно было строить двигатель-генераторную установку для преобразования тока высокого напряжения в ток низкого напряжения.

В связи с этим понятен тот интерес, который начинают проявлять многие электрики с середины 80-х годов к переменному току. Как раз к середине 80-х годов техника переменного тока получила уже такое развитие, что оказалось вполне возможным начать работы по электрификации на базе переменного тока.

Развитие генераторов однофазного переменного тока

Получение переменного тока никогда не представляло принципиальных трудностей. Действительно, в обмотках всех электромашинных генераторов (если не считать униполярного) генерируются переменные токи, которые в машинах постоянного тока преобразуются при помощи коллектора в ток постоянного направления. Описанный в гл. 4 генератор «РМ» (1832 г.) был, как отмечалось, первым многополюсным синхронным генератором, и все последующие работы в области электрических машин были направлены на изыскание наилучших конструкций коммутрующих устройств.

Долгое время переменный ток не находил себе никакого практического применения, и поэтому попытки сконструировать генераторы переменного тока до конца 70-х годов носили эпизодический характер. В этот период генераторы переменного тока представляли собой обычно машины постоянного тока, у которых коллектор был заменен двумя контактными кольцами. Так, в 1863 г. Уайльд работал в качестве одного из вариантов машины с электромагнитами генератор переменного тока. Этот генератор внешне был очень похож на машину, описанную в гл. 4 (рис. 4-33), и отличался от нее лишь тем, что вместо коллектора, состоявшего из двух пластин, имел два контактных кольца. Обмотка электромагнитов питалась от отдельного магнитоэлектрического генератора, укрепленного на ядре основной машины.

4 года спустя (1867 г.) Уайльд построил новый генератор переменного тока, который не имел отдельного возбуждателя. На двух-Т-образном якоре этого генератора были укреплены две обмотки: главная, которая через два контактных кольца отдавала ток во внешнюю цепь, и вспомогательная, которая через двухпластинчатый коллектор питала обмотку электромагнитов. Основным недостатком этой машины являлись большие потери в стали электромагнитов из-за резких пульсаций магнитного потока в сердечниках. Эти пульсации потока определялись пульсирующим характером тока, получаемого при наличии двух-Т-образного якоря. Нагрев сердечников был столь велик, что машина не могла непрерывно работать сколько-нибудь длительное время.

Наиболее существенный толчок работам в области генераторов переменного тока дала электрическая свеча Яблочкова. Как указывалось выше, П. Н. Яблочков явился

инициатором внедрения переменного тока в систему электрического освещения. В связи с этим были предложены различные конструкции машин переменного тока, специально предназначенные для снабжения энергией установки для электрического освещения по системе Яблочкова. Около 1878 г. Яблочков совместно с заводом Грамма разработал несколько однотипных конструкций генераторов для питания 4, 6, 16 или 20 свечей. Рассмотрим в качестве при-

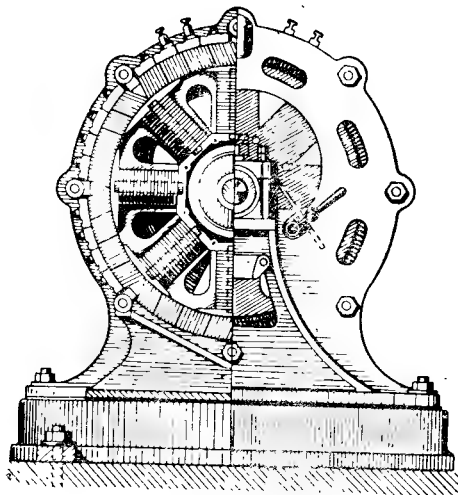


Рис. 6-5. Генератор переменного тока Яблочкова—Грамм.

мера конструкцию генератора на 16 свечей (рис. 6-5). Кольцевой неподвижный якорь имел секционированную обмотку, секции которой образовывали четыре отдельные цепи по четыре катушки на каждую цепь. На валу машины вращались восемь полюсов, возбуждавшихся постоянным током. Таким образом, на каждый полюс приходилось две катушки, в которых индуктировались токи, сдвинутые по фазе друг относительно друга на четверть периода. Катушки соединялись друг с другом через одну так, чтобы токи в одной цепи совпадали по фазе. От каждой цепи питались четыре свечи Яблочкова. Следовательно, рассматриваемый генератор представлял собой не что иное, как двухфазную синхронную машину с электрически не связанными фазами. Впрочем, конструкторы не стремились создать многофазную систему токов, а, решая задачу «дроб-

ления света», искали возможность построить генератор с несколькими цепями и вместе с тем улучшить использование машины, чего они и достигли, сделав обмотку якоря двухфазной.

Яблочковым были предложены также и некоторые другие конструкции генераторов переменного тока, не сыгравшие либо вообще, либо в то время заметной роли в истории электротехники. К таким машинам можно отнести генератор с возвратно-поступательным движением якоря (1876 г.) и индукторные генераторы (1877 и 1881 гг.).

Наиболее серьезным препятствием на пути развития генераторов переменного тока являлся нагрев стальных сердечников. Выше указывалось, что нагрев сердечников электромагнитов был одним из главных недостатков генератора Уайльда. Но не в меньшей степени препятствовал развитию генераторов и нагрев сердечника якоря. В обмотках якорей протекал переменный ток, и вопрос о снижении величины потерь в стали якоря со временем приобрел первостепенную важность, будучи при этом и трудноразрешимым. Действительно, практика изготовления шихтованных сердечников начала утверждаться только в 80-х годах, а до того и еще в начале 80-х годов сердечники как стержневых, так и кольцевых и даже барабанных якорей главным образом из-за технологических трудностей делались массивными. В этих условиях становятся понятными две главные тенденции в развитии генераторов переменного тока: 1) для увеличения мощности машины увеличивать число катушек якоря (та же тенденция, что и в машинах постоянного тока в 40—50-х годах прошлого столетия) и 2) для снижения потерь в сердечниках (а, следовательно, и их нагрева) уменьшать объем стали в якоре. Последнее направление привело к тому, что некоторые генераторы стали изготавливаться с катушками, которые вообще не имели стальных сердечников.

Указанные тенденции можно проиллюстрировать несколькими примерами наиболее типичных машин, построенных в 80-х годах. Так, на рис. 6-6 показан генератор Сименса с большим числом катушек на статоре, питаемых от отдельного возбудителя, и катушками без стальных сердечников на роторе. Катушки ротора последовательно проходили между парами катушек статора, полярность которых чередовалась. Соединения катушек ротора друг с другом выполнены таким образом, чтобы э. д. с. их складывались (рис. 6-7).

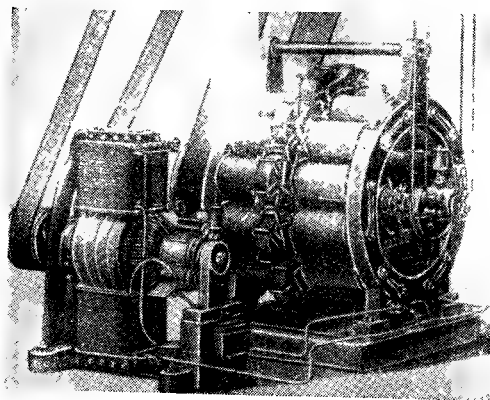


Рис. 6-6. Генератор Сименса с возбудителем (1878 г.).

Устранение стальных сердечников, естественно, увеличило магнитное сопротивление в машине, что снижало ее эффективность. Стремление уменьшить зазор между полюсами статора привело к созданию конструкций генератора с якорем дискового типа, т. е. с таким якорем, катушки которого расположены в одной плоскости и имеют минимальную высоту, определяемую иногда сечением применяемого провода. При этом наибольшее

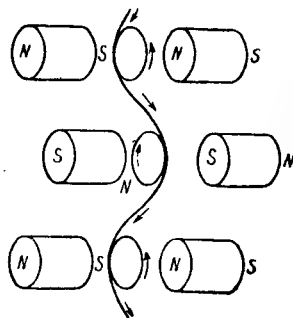


Рис. 6-7. Схема расположения и соединений катушек в генераторе Сименса.

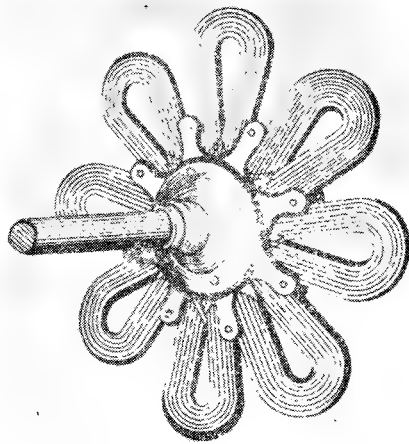


Рис. 6-8. Ротор с обмоткой «зигзаг» конструкции Ферранти.

распространение получили диски с обмотками, которые были названы их изобретателем У. Томсоном (Кельвином) обмотками «зигзаг» (1881 г.). На рис. 6-8 показана конструкция такого типа ротора, созданная в 1881—1883 гг. английским инженером С. Ц. Ферранти. Как видно из рисунка, обмотка выполнялась в виде плоских вытянутых в радиальных направлениях катушек из непрерывной изолированной медной ленты. Сердечников эти катушки не имели. На рис. 6-9 показан внешний вид машины Ферранти с дисковым ротором.

Наконец, широкую известность в 80-х годах получил своеобразный генератор, сконструированный в 1885—1886 гг. известным английским специалистом в области электрических машин Мордеем. На рис. 6-10 показан статор генератора, а на рис. 6-11—его внешний вид. На валу генератора закреплялись две системы массивных стальных полюсных наконечников, между которыми находилась общая для всех полюсов обмотка возбуждения (следовательно, полярность полюсов при вращении ротора не изменялась). Обмотка статора состояла из системы радиально расположенных катушек, которые аналогично катушкам в генераторе Ферранти состояли из изолированных медных лент, намотанных на фарфоровые каркасы. Катушки статора входили в зазор полюсных наконечников ротора. При вращении ротора магнитный поток, пронизывающий катушки статора, изменялся, так же как в обычных индукторных генераторах, от максимального до некоторого минимального значения, не изменяя своего знака. Последнее обстоятельство приводило к снижению мощности генератора в сравнении с переменнопольными машинами, в которых магнитный поток изменяется от $(+\Phi_{\text{макс}})$ до $(-\Phi_{\text{макс}})$.

Генераторы Мордея выгодно отличались от машин Ферранти в том отношении, что легкие катушки якоря укреплялись на статоре, тогда как в машине Ферранти катушки

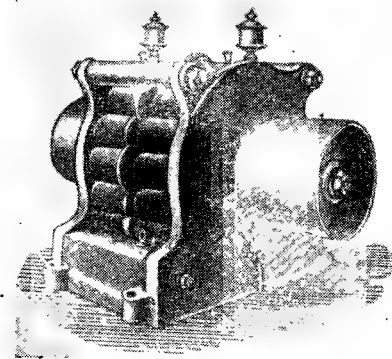


Рис. 6-9. Внешний вид генератора Ферранти с дисковым ротором.

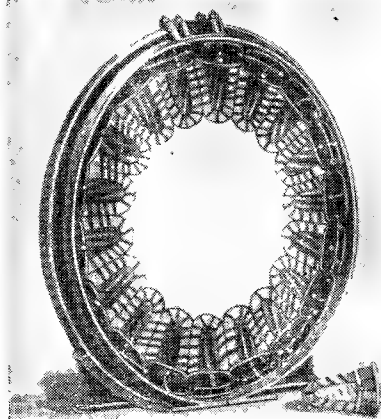


Рис. 6-10. Статор генератора Мордея.

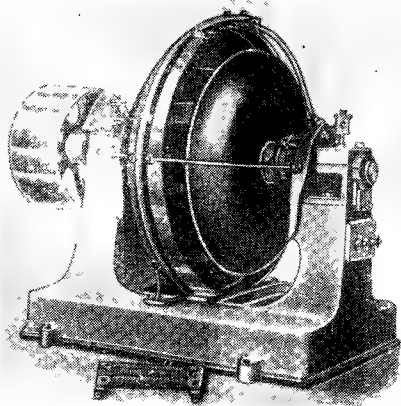


Рис. 6-11. Внешний вид генератора Мордея.

ротора испытывали большие центробежные нагрузки. Наличие в генераторе Мордея тяжелых стальных полюсов на роторе оказалось очень удобным при приводе вала генератора от поршневой паровой машины: эти полюсы являлись своеобразным маховиком, сглаживавшим циклические толчки штока паровой машины. Генераторы изготовлялись на мощности до 40 кВт и напряжение до 2 кВ, а затем и выше.

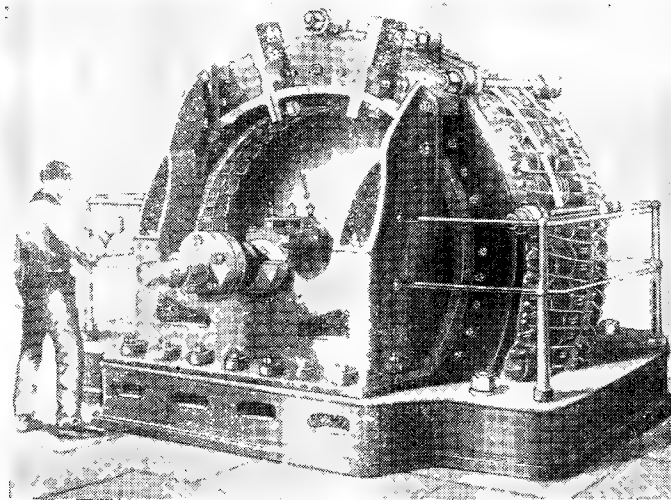


Рис. 6-12. Генератор переменного тока мощностью 115 кВт (1882—1885 гг.).

В качестве одной из наиболее крупных для своего времени машин переменного тока можно рассмотреть генератор, построенный в конце 1882 г. английским инженером Дж. Гордоном. На рис. 6-12 показан один из таких генераторов, установленных в 1885 г. на тепловой электростанции Паддингтон в Англии. Генератор был выполнен двухфазным с катушечными обмотками и предназначался, так же как и генератор Яблочкова—Грамма, для раздельного питания различных ламп. Машина имела мощность 115 кВт при напряжении 105 В и весила 18 т. Приводилась она от поршневой паровой машины со скоростью 146 об/мин и вырабатывала переменный ток с частотой 40 Гц. Возбудитель приводился от отдельной паровой машины.

Таким образом, можно констатировать, что к середине 80-х годов уже были разработаны и применялись пригодные для практических целей генераторы переменного тока. Современный период в развитии генераторов переменного тока начался в 90-х годах прошлого столетия, когда стали изготавливать трехфазные машины с шихтованными сердечниками и барабанным типом якорных обмоток.

Развитие однофазных трансформаторов

В развитии трансформаторов тоже можно выделить несколько характерных периодов, обусловленных постепенным расширением практических применений электричества и достижениями науки. В течение приблизительно полустолетия, с начала 30-х годов XIX в., когда было открыто явление электромагнитной индукции, и до середины 80-х годов, когда началось широкое применение электричества, трансформатор прошел длинный путь от простейшей индукционной катушки до промышленного типа трансформатора однофазного тока, а в начале 90-х годов — трансформатора трехфазного тока.

Первый период (30-70-е годы) характеризуется зарождением и развитием принципов трансформации, созданием индукционных приборов, преобразующих импульсы постоянного тока одного напряжения в импульсы тока другого напряжения. Принцип индуктивной связи двух обмоток, укрепленных на стальном сердечнике, был показан в известном опыте М. Фарадея (см. рис. 4-9). В конце 40-х годов и позднее большое распространение получили индукционные катушки (Б. С. Якоби, Г. Д. Румкорфа и др.), которые позднее сыграли особенно существенную роль в качестве аппаратов системы зажигания двигателей внутреннего сгорания. Следует отметить, что подобные устройства нельзя назвать трансформаторами в современном смысле этого слова. По мере развития применений электричества и роста числа потребителей энергии возникала необходимость в совершенствовании методов трансформации, без которых невозможно было осуществлять распределение электрической энергии.

Второй период (середина 70-х — середина 80-х годов) характеризуется применением индукционных катушек в сети переменного тока, представлявших собой трансформатор однофазного тока с разомкнутой магнитной системой. Первыми такими трансформаторами, как уже указывалось, были индукционные катушки Яблочкова, использованные им для осуществления дробления электрической энергии.

Дальнейшим продолжением и развитием подобного применения трансформаторов с разомкнутой магнитной цепью являлись работы И. Ф. Усагина, Люсьена Голяра и Э. Д. Гиббса и др.

В 1882 г. во время Московской промышленной выставки лаборант Московского университета И. Ф. Усагин демонстрировал устройство, показавшее, что предложенный П. Н. Яблочковым способ распределения энергии при помощи индукционных катушек может быть вполне успешно применен для одновременного питания любого типа приемников электрического тока. Усагин воспользовался индукционными катушками с разомкнутой магнитной системой и совершенно одинаковыми первичной и вторичной обмотками. Схема опыта Усагина изображена на рис. 6-13. Первичные обмотки семи катушек 2 включались последовательно в цепь однофазного переменного тока, а в каждую вторичную обмотку включались разные приемники тока: электро-двигатель, проволоочная нагревательная спираль, дуговая лампа с регулятором, электрические свечи Яблочкова. Все эти приемники могли

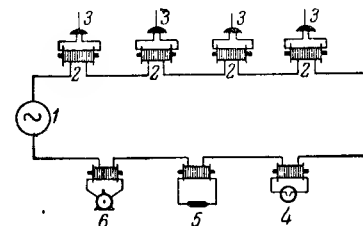


Рис. 6-13. Схема распределения электроэнергии посредством трансформаторов (Усагин, 1882 г.).

1 — генератор; 2 — трансформаторы с разомкнутой магнитной системой; 3 — свечи Яблочкова; 4 — дуговая лампа с регулятором; 5 — проволоочная нагревательная спираль; 6 — электродвигатель.

Новым шагом в использовании трансформаторов с разомкнутой магнитной системой для целей распределения электроэнергии явилась «система распределения электричества для производства света и двигательной силы», запатентованная во Франции в 1882 г. Голяром и Гиббсом. Трансформаторы Голяра и Гиббса предназначались уже не только для дробления энергии, но и для преобразования напряжения, т. е. они имели коэффициент трансформации, отличный от 1. Общий вид «вторичного генератора» (как его называли) Голяра и Гиббса изображен на рис. 6-14. На деревянной подставке укреплялось некоторое число вертикальных индукционных катушек, первичные обмотки которых соединялись последовательно. Вторичные обмотки каждой катушки были секционированы, и каждая секция

имела пару выводов для присоединения приемников тока, которые действовали независимо.

Последовательно соединенные индукционные катушки создавали определенное индуктивное сопротивление, величина которого (а в некоторых пределах и ток в цепи) могла регулироваться путем перемещения сердечников катушек (на рис. 6-14 часть сердечников выдвинута).

Трансформаторы Голяра и Гиббса впервые демонстрировались в апреле 1883 г. на осветительной установке в Вестминстерском аквариуме (Лондон). Первичные об-

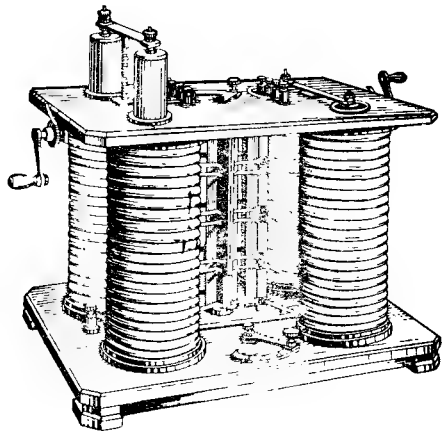


Рис. 6-14. Трансформатор Голяра и Гиббса.

мотки двух трансформаторов были соединены последовательно. Вторичная обмотка одного трансформатора питала 26 ламп накаливания (ток 40 а), а три вторичные обмотки другого — соответственно пять ламп накаливания, свечу Яблочкова и электродвигатель.

Схема последовательного включения обмоток трансформаторов возникла исторически в связи с применением дуговых ламп. В системах дугового освещения, как правило, регулировалась величина тока в цепи последовательно включенных потребителей. В случае применения ламп накаливания и других видов приемников тока, для которых важным является поддержание постоянной величины напряжения, более целесообразным стало их параллельное включение. Но если для последовательного соединения элементов электрической цепи весьма подходящими были

трансформаторы с разомкнутой магнитной цепью, которые представляли собой умеренное индуктивное сопротивление, хотя и не являлись наилучшей конструкцией в магнитном отношении, то при параллельном включении приемников становилось технически не оправданным применение трансформаторов с разомкнутыми сердечниками. Поэтому вполне понятным становится стремление в этот период осуществить конструкции трансформаторов с замкнутой магнитной системой, обладающих значительно лучшими характеристиками (меньшая величина намагничивающего тока, а следовательно, меньшие потери и более высокий коэффициент мощности). При последовательном соединении элементов электрической цепи было нецелесообразно применять трансформаторы с замкнутой магнитной системой, обладающие очень большой индуктивностью.

В течение *третьего периода* (от середины 80-х годов до начала становления техники трехфазного тока — в 90-е годы) был разработан промышленный тип трансформаторов с замкнутой магнитной системой, а также предложено параллельное включение трансформаторов в питающую линию. Первая конструкция трансформаторов с замкнутой магнитной системой (рис. 6-15) была создана в Англии в 1884 г. братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсон. Сердечник этого трансформатора был набран из стальных полос или проволок, разделенных изоляционным материалом, что снижало потери на вихревые токи. На сердечнике помещались, чередуясь, катушки высшего и низшего напряжений.

Параллельное включение трансформаторов было впервые предложено и обосновано венгерским электротехником М. Дери, который получил патент на этот способ соединения в 1885 г. (независимо от него такое же предложение было сделано в Англии С. Ц. Ферранти и в Америке Кеннеди). Только после этих предложений трансформаторы с замкнутыми сердечниками могли получить применение.

Практическая реализация прогрессивных идей о передаче электрической энергии переменным током высокого напряжения оказалась возможной после создания промышленного типа трансформатора с замкнутой магнитной системой, имевшего достаточно хорошие эксплуатационные показатели. Такой трансформатор в нескольких модификациях (кольцевой, броневого и стержневого) был разработан в 1885 г. венгерскими электротехниками О. Блати, М. Дери и К. Циперновским. В патентной заявке они отмечают важ-

ное значение замкнутого шихтованного магнитного сердечника, в особенности для мощных силовых трансформаторов. На рис. 6-16 изображен общий вид серийного типа кольцевого трансформатора системы Блати, Дери и Циперповско-

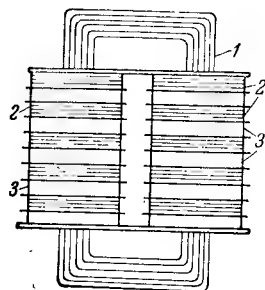


Рис. 6-15. Схема трансформатора Гопкинсон.

1—стальной шихтованный сердечник; 2—обмотки высшего напряжения; 3—обмотки низшего напряжения.

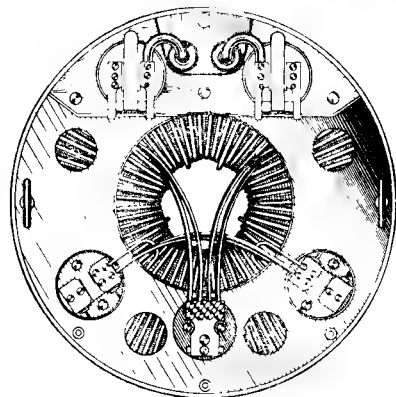
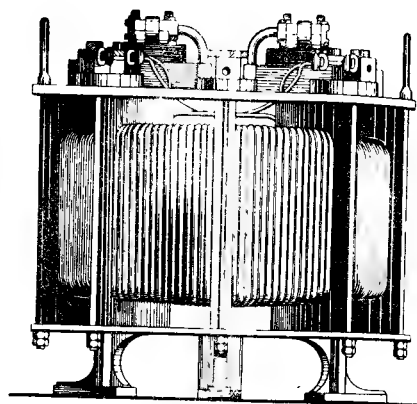


Рис. 6-16. Трансформатор будапештского завода Ганц (системы Дери, Блати и Циперповского).

го. Такие трансформаторы выпускались электромашиностроительным заводом в Будапеште. Важное значение для расширения практических применений трансформаторов и улучшения надежности их работы имело введение в конце 80-х годов (Д. Свинберн) масляного охлаждения трансформаторов. Первые такие трансформаторы помещались в керамический сосуд, наполненный керосином или маслом.

Таким образом, к середине 80-х годов, когда стало ясно, что техника постоянного тока не в состоянии разрешить проблему передачи энергии на большие расстояния, были разработаны удовлетворительные конструкции генераторов и трансформаторов переменного тока. Значительно сложнее обстояло дело с электродвигателями переменного тока.

Электродвигатели переменного тока

Известно, что электрическая машина обладает свойством обратимости. С этой точки зрения принципиальных трудностей для построения двигателей переменного тока не было. Действительно, еще в 1841 г. Чарльз Уитстон построил синхронный электродвигатель, схема которого показана на рис. 6-17. Если обмотки электромагнитов питать переменным током, то обращенные друг к другу концы их одновременно через каждые полпериода изменяют свою полярность. Следова-

Разрез по I-I

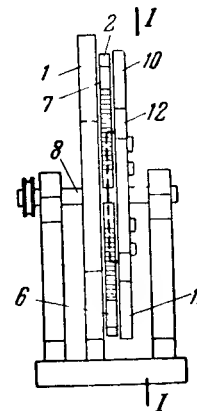
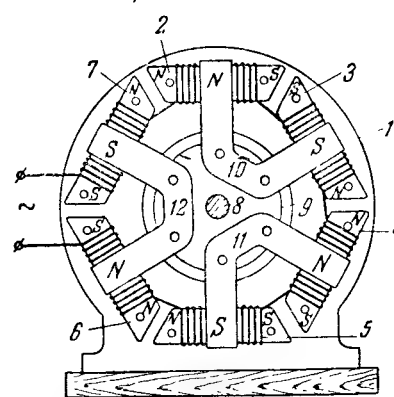


Рис. 6-17. Синхронный электродвигатель Уитстона (1854 г.).
1—деревянный щит; 2—7—электромагниты; 8—вал; 9—латунный диск; 10—12—постоянные магниты.

тельно, полюсы постоянных магнитов, взаимодействуя с полюсами электромагнитов, будут вращаться синхронно со скоростью изменения полярности электромагнитов¹.

Аналогичным образом можно было построить синхронный двигатель, заменив постоянные магниты электромагнитами, обмотки которых питались бы постоянным током.

Однако очевидным недостатком всех однофазных синхронных двигателей являлся затрудненный их пуск, особенно под нагрузкой. Двигатель будет хорошо работать,

¹ Синхронную скорость легко подсчитать по известной формуле:

$$n = \frac{60 f}{p},$$

где n — скорость, об/мин;

f — частота переменного тока, гц;

p — число пар полюсов постоянных магнитов.

если разогнать его до некоторой скорости, более или менее близкой к синхронной, после чего он самостоятельно втянется в синхронизм. Понятно, что такие электродвигатели, нуждающиеся в дополнительных разгонных двигателях, не могли иметь сколько-нибудь широкого практического применения. В современных синхронных многофазных двигателях для пуска их в ход обычно на роторе устанавливается дополнительная короткозамкнутая обмотка и двигатель пускается как асинхронный, а затем втягивается в синхронизм. Асинхронный пуск однофазных синхронных двигателей невозможен, так как магнитное поле в них не вращается, как в многофазных машинах, а пульсирует.

Имелась возможность применять в сетях однофазного тока коллекторные двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением. При питании этих двигателей переменным током направление основного магнитного потока изменяется одновременно с изменением направления тока в якоре, следовательно вращающий момент имеет постоянное направление. Впервые предложили применять коллекторные однофазные двигатели в 1885 г. М. Дери и О. Блати. Однако широкого распространения эти двигатели тоже не нашли, главным образом по двум причинам: чрезмерный нагрев сердечников электромагнитов вихревыми токами (в дальнейшем сердечники стали делать шихтованными) и тяжелые условия коммутации тока, вызывавшие сильное искрение на коллекторе. Несколько улучшало дело применение дополнительных полюсов, однако они оказались неэффективными в пусковых условиях. Поэтому коллекторный однофазный двигатель получил весьма ограниченное применение, а в настоящее время он используется главным образом на электрифицированных железных дорогах однофазного тока. Для облегчения условий его работы в последнем случае обычно снижают частоту тока до 25 или $16\frac{2}{3}$ гц.

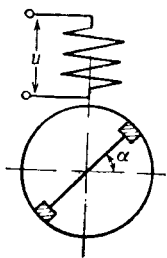


Рис. 6-18. Схема репульсионного двигателя И. Томсона.

Еще одна попытка построить однофазный двигатель была сделана американским изобретателем И. Томсоном, предложившим в 1886 г. конструкцию репульсионного двигателя.

В этом двигателе нет электрической связи между обмотками статора и ротора, и энергия к ротору передается электромагнитным путем (индукционный принцип). На рис. 6-18 представлена принципиальная

электрическая схема репульсионного двигателя Томсона. На статоре его размещена обычная обмотка машины однофазного тока, а ротор выполнен в виде якоря машины постоянного тока. На коллекторе находятся подвижные замкнутые накоротко щетки, которые могут перемещаться по коллектору, в результате чего можно произвольно изменять угол α . Если $\alpha=0$, то токи в обмотке якоря взаимно компенсируются и вращающий момент двигателя тоже равен нулю. При $\alpha=90^\circ$ ток в роторе будет максимальным, но направления намагничивающих сил обмоток статора и ротора оказываются встречными и момент вновь равен нулю. При всех промежуточных значениях угла α вращающий момент имеет определенное значение, так как намагничивающие силы обмоток статора и ротора тоже смешиваются относительно друг друга на угол α .

Репульсионные двигатели удобно пускаются в ход путем поворота щеток. Таким же путем регулируется их скорость. Но, так же как и двигатели последовательного возбуждения, они имеют сравнительно тяжелые условия коммутации тока, вызывающие искрение на коллекторе. Особенно тяжелы условия коммутации при скоростях, значительно отличающихся от синхронной. В связи с указанными затруднениями репульсионные двигатели строятся только на малые мощности (до нескольких киловатт) и не получили заметного распространения.

Таким образом, несмотря на наличие однофазных генераторов и трансформаторов, техника однофазного тока не имела больших перспектив из-за ограниченных возможностей применения электродвигателей.

Поскольку все основные элементы системы переменного тока были разработаны, вполне естественным было попытаться осуществить передачу электроэнергии на большие расстояния этим родом тока. Первый опыт электропередачи переменным током был осуществлен Л. Голяром на Туринской выставке в 1884 г. В этом опыте были использованы трансформаторы Голяра и Гиббса, которые повышали напряжение до 2 кв. Длина линии составляла 40 км, и по ней передавалась мощность около 20 квт.

Позднее были сделаны попытки осуществить промышленные установки электропередачи, о которых подробнее сообщается ниже [передачи в Портленде (США) 1889 г., 14 миль, в Лондоне, 1890 г., 12 км и др.]. Однако во второй половине 80-х годов уже возникала потребность включать в сеть электростанций силовую нагрузку. Таким образом, в случае передачи электроэнергии однофазным переменным током возникло противоречие, не менее серьезное, чем

в случае электропередачи постоянным током, но обратного характера. Напряжение однофазного переменного тока можно легко повышать и понижать с помощью трансформаторов практически в любых желаемых пределах. Следовательно, для передачи электроэнергии затруднений не было. Но однофазные двигатели переменного тока имели совершенно неприемлемые для целей практики характеристики; в частности, они, как было показано выше, либо вообще не имели пускового момента (синхронные двигатели), либо пускались с очень большим трудом из-за тяжелых условий коммутации тока (коллекторные двигатели). Поэтому сфера применения однофазного тока должна была ограничиться почти исключительно электрическим освещением, что, конечно, не могло удовлетворить возрастающие потребности промышленности.

Обострение
противоречий
в области
электропередачи.
Борьба за выбор
рода тока

Проблема электропередачи по существу являлась комплексной проблемой, затрагивавшей чуть ли не все области развивавшейся электротехники. Предстояло одновременно решить и вопрос передачи энергии при высоком напряжении и вопрос создания электрического двигателя, удовлетворявшего требованиям промышленного электропривода.

Из изложенного выше следует, что к концу 80-х годов прошлого столетия создался своеобразный кризис в развитии электротехники. Положение было таково, что комплексная проблема электропередачи и потребления электроэнергии оказалась центральной не только в области электротехники, но и в развитии промышленности и техники вообще. Действительно, капиталистическое производство, которое приобретало все более концентрированный характер, требовало концентрированного же производства энергии. К тому времени стало ясно, что наиболее удобной и поэтому весьма желательной была бы следующая схема энергоснабжения промышленных предприятий: производство в больших масштабах электроэнергии в местах дешевых источников первичной энергии (тепловой или гидравлической) и передача ее на необходимое расстояние к местам потребления. Только в этом случае промышленность могла бы освободиться от сковывавших ее рамок, которые налагались местными энергетическими условиями или экономическими соображениями при транспортировке топлива. Проблема передачи электроэнергии на большие рас-

стояния в конце XIX в. перерастала в общеэкономическую проблему. Необходимость решения этой задачи неумолимо диктовалась всем историческим ходом развития общественного производства. Но для этого нужно было новое техническое средство. Таким средством явилась разработанная в 1888—1891 гг. система трехфазного тока.

Мы видим, что за 10—15 лет были испытаны все основные системы электрического тока. Действительно, до изобретения свечи Яблочкова (1876 г.) электротехника была почти исключительно техникой постоянного тока. Свечи Яблочкова вызвали к жизни технику переменного тока. После 1881 г., когда широкое распространение стали получать лампы накаливания и расширилось применение электродвигателей, было вновь обращено исключительное внимание на постоянный ток: для ламп накаливания род тока безразличен, а для двигателей постоянный ток был более удобен, чем однофазный переменный. Интересно в связи с этим отметить, что на Мюнхенской международной электротехнической выставке 1882 г. машины переменного тока были признаны «устаревшими». Когда выявились серьезные затруднения с передачей электроэнергии на расстояние, вновь вернулись к переменному току и создали промышленные типы трансформаторов (1885 г.). Наконец, поскольку однофазный ток не мог удовлетворить новым требованиям промышленности, обратились к изучению систем многофазных токов (1888 г.).

Следует иметь в виду, что поиски наилучшего рода тока для электрификации не проходили безболезненно. В условиях зарождения электропромышленности каждое изменение рода тока вызывало необходимость изменения технологии только что налаженного производства электроизделий. Та или иная фирма, владея определенными патентами, стремилась как можно дольше сохранить возможность производить машины, аппараты, приборы и armатуру, предназначенные для соответствующего рода тока. Поэтому борьба за выбор рода тока выходила за пределы научных дискуссий и становилась ожесточенной конкурентной борьбой капиталистических компаний. За спинами ученых стояли конкурирующие фирмы: нередко даже крупные ученые и изобретатели, защищая интересы тех или иных капиталистических компаний, вели между собой борьбу не на принципиальной основе, а в угоду торговым интересам. Так, например, получила широкую известность борьба между двумя ведущими американскими электротехническими фир-

мами: компанией Эдисона (впоследствии Джeneral Электрик) и компанией Вестингауз. Первая фирма специализировалась на производстве оборудования для установок постоянного тока, вторая — переменного. Эдисон, пользуясь своим авторитетом в электротехнических кругах, выступал за повсеместное применение постоянного тока и, в сущности говоря, тормозил развитие техники переменного тока. Он не принял в 1889 г. приглашения познакомиться столько что построенным Доливо-Добровольским трехфазным асинхронным двигателем, заявив: «Нет, нет, переменный ток — это вздор, не имеющий будущего. Я не только не хочу осматривать двигатель переменного тока, но и знать о нем». Постепенно в эту борьбу были втянуты почти все крупные деятели в области электротехники. Так, против применения переменного тока выступали такие авторитетные ученые и инженеры, как М. Депре, Д. А. Лачинов, В. Н. Чиколев и др.

В этой сложной обстановке предстояло разработать систему многофазных токов и доказать ее преимущества перед другими системами.

6-3. НАЧАЛО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Причины
возникновения
комплексной
энергетики

Возникшее после промышленного переворота капиталистическое машинное производство получило свою энергетическую базу в виде парового универсального двигателя. Для энергоснабжения новых промышленных предприятий было необходимо транспортировать топливо к заводу или фабрике, где оно частично шло на технологический нагрев, а частично для снабжения теплосиловой установки предприятия. Капиталистическая концентрация промышленности сопровождалась концентрацией средств производства, выражавшейся, в частности, в укрупнении промышленных предприятий, позволявшем снижать себестоимость продукции и усиливать конкурентоспособность капиталистических фирм.

Укрупнение промышленных предприятий требовало в свою очередь возрастания мощности теплосиловых установок заводов и фабрик. Постепенно простое увеличение установленной мощности силовых установок промышленных предприятий перестало вызывать пропорциональное увеличение количества выработанной продукции или снижение ее себестоимости. Такое нарушение пропорциональности являлось следствием увеличения расходов и потерь,

происходивших от существовавших методов транспорта и распределения энергии. Транспорт энергии от места расположения ее природных источников стал с ростом потребления усложняться и удорожаться. Это было следствием двух причин. Первая причина состояла в увеличении дальности перевозок энергоносителя — топлива в связи с исчерпанием местных или близлежащих ресурсов. Вторая причина обуславливалась тем, что с увеличением дальности перевозок топлива начался переход от мелкопроизводительных, но дешевых видов транспорта (гужевые перевозки, сплав леса) к более производительному, но и более дорогому (вследствие затраты значительной части транспортируемой энергии в паровозных топках) железнодорожному транспорту.

Проблема перевозок топлива, возникшая в связи с ростом городов и развитием промышленных предприятий, резко обострилась. Большая доля расхода на топливо в стоимости промышленной продукции обратила внимание технической общественности на «бесплатные» источники водной энергии, удаленные от многих промышленных городов, чаще всего стихийно возникавших без учета потребности в энергоресурсах.

С укрупнением промышленных предприятий задача распределения энергии резко обострилась. Механический метод распределения энергии становился неспособным удовлетворительно выполнять возлагаемые на него функции.

В течение второй половины XIX в. на улучшение конструкции передаточных механизмов было обращено самое серьезное внимание. Изыскивались и осуществлялись новые конструктивные формы техники механической передачи энергии. Разрабатывались теории передач, теория зацепления, расчетные формулы, стандарты и нормы. Строились и исследовались зубчатые, ременные, канатные, ленточные, цепные, фрикционные и другие виды передач. Улучшались конструкции валов, соединительных муфт, были введены подшипники качения.

Такое пристальное внимание к технике механических передач далеко не случайно. Оно объясняется тем, что механическая передача с увеличением мощности двигателя и числа приводимых рабочих машин все хуже решала возложенную на нее задачу. Это ухудшение самым очевидным образом сказывалось в доле мощности, расходуемой на преодоление механических потерь в системе трансмиссион-

ных передач, отражаемой в их к. п. д. Несмотря на прогресс в конструировании, выполнении и эксплуатации каждой из отдельных деталей, каждого из отдельных узлов трансмиссии, общий к. п. д. трансмиссии все снижался, доходя до значения 0,5. Потеря половины энергии, вырабатываемой дорожно-транспортным средством, означала возникновение и обострение очевидного кризиса механической передачи энергии в форме трансмиссионных систем.

Поскольку механика как теоретическая наука, питаемая потребностями практики, сложилась ранее других,

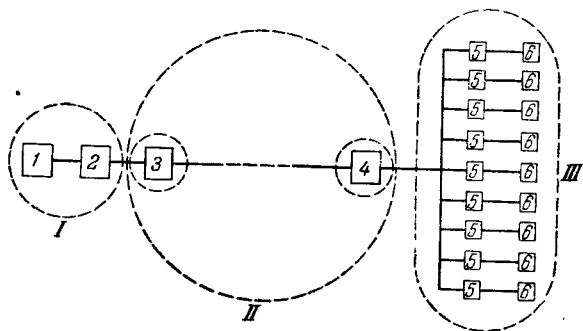


Рис. 6-19. Схема передачи и распределения энергии с применением промежуточного энергоносителя.

I — станция: 1 — первичный двигатель; 2 — генератор вторичной энергии; II — передача: 3 — повышающая подстанция; 4 — понижающая подстанция; III — распределение энергии (в данном случае — привод): 5 — вторичные двигатели; 6 — рабочие машины.

наук, первые попытки изыскания принципиально новых методов распределения энергии не выходили за рамки механики, и от механики твердых тел обратились к механике капельных жидкостей и газов. Это были попытки решения задачи распределения механической работы посредством гидравлических и пневматических передач.

Одновременно с этим возникали и складывались условия для решения задачи о передаче и распределении более универсальной энергии, более гибкой, наиболее легко преобразуемой в другие виды энергии. Такой энергией была электрическая. Она могла получаться в качестве вторичной, генерируемой за счет затраты эквивалентного количества первичной энергии.

На рис. 6-19 показана принципиальная схема передачи и распределения энергии, предусматривающая применение

промежуточного энергоносителя (вода или воздух под давлением, электрическая энергия).

Итак, электрические системы, включающие в себя электропередачи и электропривод, явились наилучшим решением задачи, неизбежно возникшей как следствие концентрации производства: необходимости транспорта и распределения энергии. Отсюда видно, что представление о том, будто внедрение электротехники и, в частности, электрификация являются заменой парового двигателя электрическим, не только является упрощенным, но и неверно по существу. Электрификация, техническая сущность которой заключается в энергоснабжении промышленности, транспорта и сельского хозяйства путем передачи и распределения электрической энергии, создала техническую базу для возможности дальнейшей технической концентрации капиталистического производства и этим самым решительным образом стимулировала быстрое количественное и качественное развитие первичной энергетики, призванной теперь вырабатывать громадные количества электроэнергии. Так складывалась современная комплексная энергетика. Она включает в себя два преимущественно используемых вида первичной энергии: тепловую и гидравлическую и вырабатываемую за их счет с целью распределения вторичную энергию — электрическую. В середине XX в. мировой энергетический баланс (1952 г.) складывается из 97,6% тепловой, 1,4% гидравлической и 1,0% биологической энергии; но только 3% энергии преобразуется в электрическую (1,6% на тепловых и 1,4% на гидравлических электростанциях).

Электрическая станция становится «фабрикой» нового товара — электроэнергии. Широкий спрос на этот товар не ставит экономических ограничений масштабам выработки электроэнергии. Перед инженерами, учеными, техниками, изобретателями встает ответственная задача: ликвидировать технические ограничения выработки электроэнергии. Эти ограничения прежде всего вытекали из уровней развития тепло- и гидроэнергетики, определялись до сих пор потребностями в энергии отдельных предприятий. Теперь тепловые и гидравлические силовые установки должны были вырабатывать энергию в количестве, удовлетворявшем потребностям целых промышленных районов.

Процесс исторического становления комплексной энергетики начался с конца 70-х и начала 80-х годов XIX в. Электрические станции, родившиеся в эти годы, прошли значи-

тельный путь развития и явились в дальнейшем основным звеном, энергетической базой процесса электрификации со всеми ее техническими, экономическими и социальными следствиями.

В гл. 12 будут более подробно рассмотрены вопросы периодизации развития производства, передачи и распределения электроэнергии, а также развитие отдельных элементов электрических станций и систем. Здесь мы коснемся только начального периода развития средств и методов производства и распределения электроэнергии, для которого характерно сооружение местных городских и — реже — фабрично-заводских изолированно работающих электрических станций.

Развитие электростанций постоянного тока

Самые ранние установки электрического освещения (конец 70-х — начало 80-х годов XIX в.) питались от так называемых блок-станций; в современ-

ной, особенно зарубежной, литературе блок-станциями иногда называют фабрично-заводские теплоэлектроцентрали. Это были электрические станции, назначением которых являлось снабжение электроэнергией ограниченного числа потребителей, сосредоточенных в большинстве случаев в пределах одного дома или небольшого квартала города.

Такие станции иногда называли «домовыми». Распространенное тогда ошибочное убеждение в том, что дуговые лампы и лампы накаливания не могут работать в одной и той же сети, заставляло строить блок-станции отдельно для того и другого типов ламп либо разделять на блок-станциях генераторы на две группы: от одной питались сеть с дуговыми лампами, от другой — с лампами накаливания. Тормозящим фактором в развитии первых электростанций являлось и то обстоятельство, что городские власти часто запрещали воздушный подвес проводов, опасаясь за жизнь горожан и внешний вид городов. Наконец, в рассматриваемый период электрическое освещение было еще дорогой редкостью, к тому же далеко не всеми желаемой: конкурирующие газовые компании всячески подчеркивали действительные (например, чрезмерная яркость дуговых ламп) и мнимые недостатки нового рода освещения.

Все указанные причины имели общее следствие: первые электрические станции были весьма мелкими и бессистемно разбросанными по городу.

На электрических блок-станциях, строившихся в конце

70-х и в начале 80-х годов прошлого столетия, в качестве первичных двигателей применялись в основном поршневые паровые машины; в единичных случаях использовались двигатели внутреннего сгорания, в то время являвшиеся новинкой в области двигателестроения. В целях удешевления паросиловой части блок-станций на них широко применялись локомобили. От первичного двигателя к электрическому генератору делалась ременная передача, имевшая то преимущество, что при ее посредстве можно было приводить быстроходные электрические генераторы от сравнительно тихоходных паровых машин, имевших не более 200 об/мин. На блок-станциях обычно один паровой двигатель приводил в действие 1—3 генератора; поэтому на крупных блок-станциях того времени устанавливалось несколько паровых машин или локомобилей. Электрические генераторы монтировались на салазках, что позволяло осуществлять регулировку натяжения ремней.

На рис. 6-20 представлен вид «домовой» электростанции, на рис. 6-21 показан внутренний вид электростанции для питания большой осветительной установки дугowymi лампами (Филадельфия, 1881 г.).

Первые блок-станции были построены в Париже для питания свечей Яблочкова, установленных на улице Оперы, а затем стали строиться везде, где применялись электрические свечи. В России первой установкой такого рода явилась станция для освещения Литейного моста в Петербурге, осуществленная в 1879 г. при непосредственном участии П. Н. Яблочкова.

С конца 1881 г. стали устраиваться блок-станции, в сети которых включались как дуговые лампы, так и лампы накаливания. Примером первых таких станций может служить блок-станция в Честерфилде (Англия), на которой один генератор Бреша (2 кв, 10 а) питал группы последовательно-параллельно соединенных ламп накаливания и дуговых ламп; в Москве аналогичного типа станция была сооружена в Лубянском пассаже, и от семи ее генераторов снабжались током 45 дуговых ламп и 220 ламп накаливания. Однако блок-станции существовали недолго. Идея централизованного производства электроэнергии была настолько экономически оправданной и настолько соответствовала тенденции концентрации промышленного производства, что первые центральные электростанции возникли уже в середине 80-х годов и быстро свели на нет роль блок-станций. В связи с тем, что в начале 80-х годов массовыми

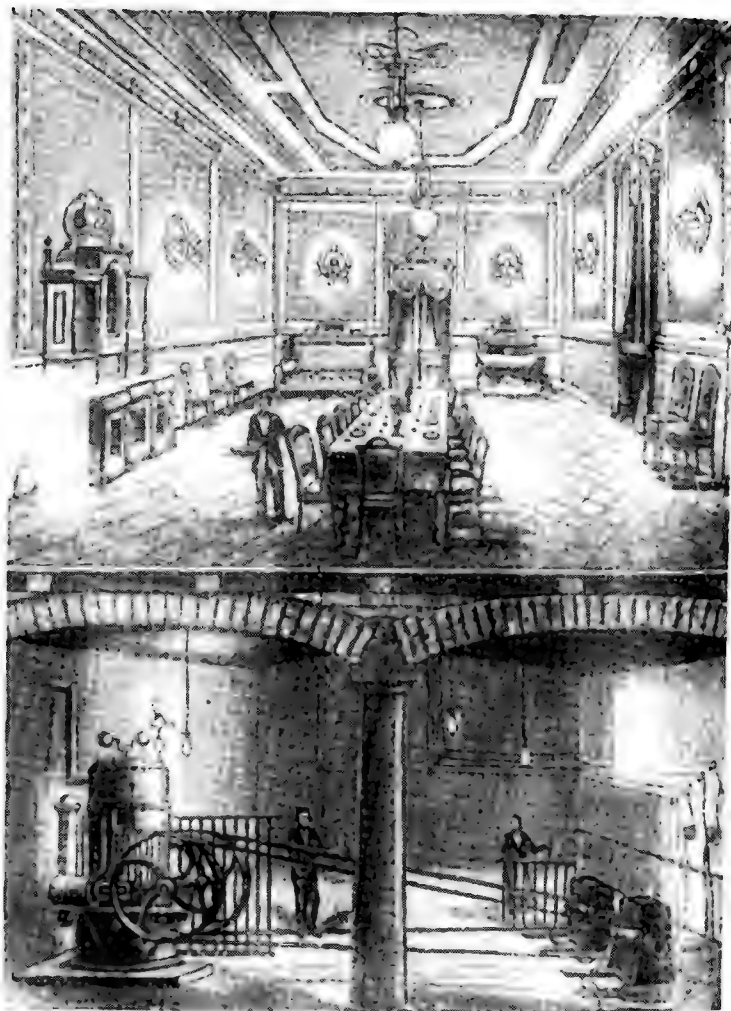


Рис. 6-20. „Блок-станция“ — электростанция (с двумя генераторами и локобилем) для освещения одного дома.



Рис. 6-21. Внутренний вид электростанции для дугового освещения.

погребителями электроэнергии могли стать только источники света, первые центральные электростанции проектировались, как правило, для питания осветительной нагрузки и вырабатывали исключительно постоянный ток.

В 1881 г. несколько предприимчивых американских финансистов под впечатлением успеха, которым сопровождалась демонстрация ламп накаливания, заключили соглашение с Эдисоном и приступили к сооружению первой в мире центральной электростанции (на Пирльстрит в Нью-Йорке). В сентябре 1882 г. эта электростанция была сдана в эксплуатацию. На рис. 6-22 показан ее внешний вид. В машинном зале станции (рис. 6-23) были установлены шесть генераторов Эдисона. Мощность каждого генератора составляла около 90 кВт, следовательно общая мощность электростанции превышала 500 кВт. Сооружения станции и ее оборудование были спроектированы весьма целесообразно, так что в дальнейшем при строительстве новых электростанций развивались многие из тех принципов, которые были предложены Эдисоном. Так, генераторы станции имели искусственное охлаждение и соединялись



Рис. 6-22. Внешний вид первой центральной электростанции.

непосредственно с двигателем. Напряжение регулировалось автоматически. На станции осуществлялись механическая подача топлива в котельную и автоматическое удаление золы и шлака. Защита оборудования от токов короткого замыкания осуществлялась плавкими предохранителями, а магистральные линии были выполнены кабельными. Станция снабжала электроэнергией обширный по тому времени район площадью $2,5 \text{ км}^2$. Вскоре в Нью-Йорке было построено еще несколько станций.

Представляет интерес вопрос о выборе напряжения для первых электростанций. Исходная величина напряжения, от которой впоследствии были произведены другие в шкалах напряжений, принятых в разных странах, сложилась исторически. Дело в том, что в период распространения дугового электрического освещения эмпирически было установлено, что наиболее подходящим для горения дуги является напряжение 45 в . Для того чтобы уменьшить токи короткого замыкания, которые возни-

кали в момент зажигания ламп (при соприкосновении углей), и для более устойчивого горения дуги включали последовательно с дуговой лампой балластное сопротивление. Так же эмпирически было найдено, что величина балластного сопротивления должна быть такой, чтобы падение напряжения на нем при нормальной работе составляло примерно 20 в . Таким образом, общее напряжение в установках постоянного тока сначала составляло 65 в , и эта величина долгое время применялась во многих

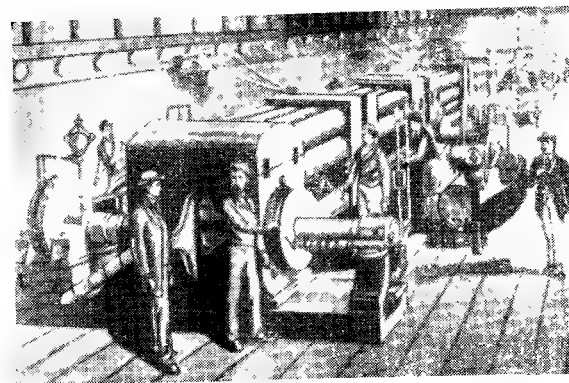


Рис. 6-23. Машинный зал первой центральной электростанции Эдисона.

установках электрического освещения. Однако часто в одну цепь включали последовательно две дуговые лампы, для работы которых требовалось $2 \times 45 = 90 \text{ в}$, а если к этой величине прибавить еще 20 в , приходящиеся на балластное сопротивление, то получится напряжение 110 в . Это напряжение почти повсеместно было принято в качестве стандартного, и именно оно открывает современную шкалу напряжений, хотя причина выбора этой величины давно забыта.

Уже при проектировании первых центральных электростанций столкнулись с некоторыми трудностями, которые не были в достаточной степени преодолены в течение всего периода господства техники постоянного тока. Дело в том, что радиус электроснабжения определялся величиной допустимых потерь напряжения в электрической сети, которые

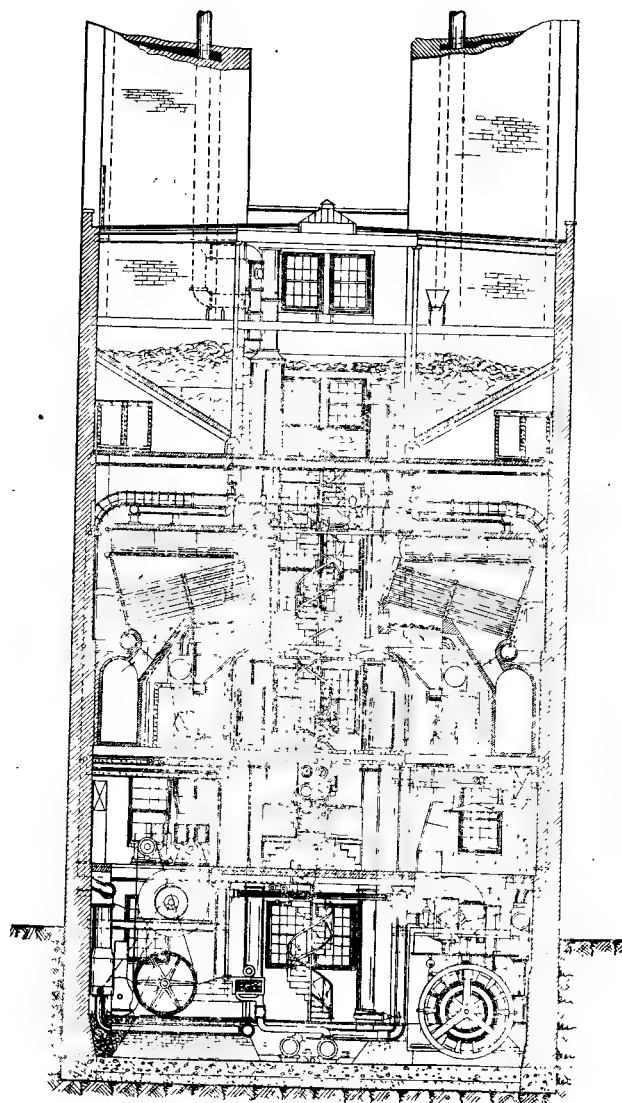


Рис. 6-24. Компонировка оборудования одной из первых электростанций в Нью-Йорке.

для данной сети тем меньше, чем выше напряжение. Но обычно применявшееся напряжение, на которое были рассчитаны лампы, составляло, как мы только что видели, 110 в. Отсюда становятся понятными те трудности, которыми сопровождалась попытка расширить район электроснабжения. Именно эти обстоятельства заставляли строить электростанции в центральных частях города, что существенно затрудняло не только снабжение водой и топливом, но и приобретение земельных участков для строительства станций, так как земля в центре города была чрез-

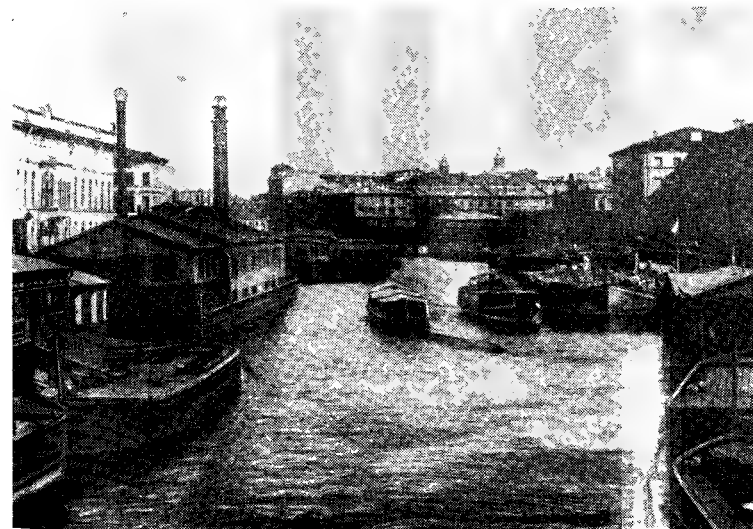


Рис. 6-25. Электростанция на р. Фонтанке в Петербурге.

вычайно дорогой. Этим, в частности, объясняется необычный вид нью-йоркских станций, на которых оборудование располагалось на многих этажах (рис. 6-24). Положение осложнялось еще и тем, что на первых электростанциях приходилось размещать большое число котлов, паропроизводительность которых не соответствовала новым требованиям, предъявляемым электроэнергетикой.

Не менее был бы удивлен наш современник, если бы он увидел первые петербургские электростанции, которые должны были обслуживать освещение в районе Невского проспекта. Они были построены в начале 80-х годов и раз-

мещались на баржах, закрепленных у причалов на рр. Мойке и Фонтанке (рис. 6-25). Строители исходили из соображений дешевого водоснабжения и пользовались возможностью отказаться от покупки участков земли.

В 1886 г. в Петербурге было учреждено акционерное «Общество электрического освещения 1886 г.» (сокращенно называвшееся «Обществом 1886 г.»), которое приобрело станции на рр. Мойке и Фонтанке и построило еще две: у Казанского собора и на Инженерной площади. Последняя станция предназначалась для уличного освещения. Мощность каждой из этих электростанций едва превышала 200 квт. «Общество 1886 г.», контролировавшееся фирмой Сименс и Гальске, строило впоследствии многие станции в Петербурге, Москве и других городах.

В Москве первая центральная электростанция (Георгиевская) была построена в 1888 г. тоже в центре города, на углу Большой Дмитровки (ныне Пушкинская ул.) и Георгиевского переулка. Она предназначалась для освещения прилегающего района и располагала мощностью 400 квт.

Ограниченные возможности расширения радиуса электроснабжения приводили к тому, что удовлетворение роста потребления электроэнергии со временем становилось невозможным. Так, например, в Петербурге и Москве к середине 90-х годов были исчерпаны возможности присоединения новой нагрузки к существующим станциям и встал вопрос об изменении схем сети или даже более радикальный — об изменении рода тока.

На центральных станциях с ростом их мощности локомотивы, применявшиеся в качестве первичных двигателей блок-станций, постепенно вытеснялись стационарными машинами. Это были машины мощностью порядка 100—300 л. с. с относительно небольшим числом оборотов вала (100—200 об/мин), что приводило к необходимости вводить между машиной и генератором ременную или канатную передачу. Давление пара не превосходило 10 кг/см², перегрев чаще всего отсутствовал.

В котельных ранних тепловых электростанций устанавливались жаротрубные котлы, однако вскоре в связи с ростом мощности возникла потребность в котлах более высокой паропроизводительности, повлекшая за собой применение водотрубных паровых котлов. В конце XIX и начале XX вв. преимущественное распространение в котельных зарубежных электростанций получили котлы Бабкок-Вилькокс, а в России — котлы системы Шухова.

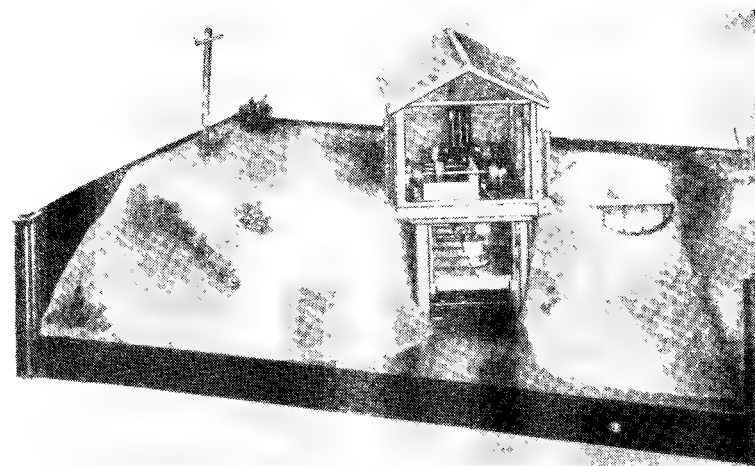


Рис. 6-26. Макет первой американской гидроэлектростанции, построенной в 1882 г.

Основным топливом котельных с ручной загрузкой служил уголь, сжигаемый на плоских колосниках. Расход угля на силу-час при таком способе сжигания, при отсутствии экономайзеров, подогрева воздуха и при плохой изоляции был в 3—4 раза выше, чем на современных станциях.

Рост потребности в электроэнергии явился эффективным стимулом к повышению производительности и экономичности тепловой части электрических станций. Если ранее технический прогресс теплоэнергетики шел преимущественно под влиянием требований транспортных установок (пароходов и паровозов), то, начиная с первого десятилетия XX в., он в сильнейшей степени стал определяться потребностями электрических станций.

Прежде всего следует отметить решительный поворот от поршневых паровых машин к паровым турбинам. Первая паровая турбина на электростанциях России была установлена в 1891 г. в Петербурге (станция на р. Фонтанке). За год до этого испытание турбины было проведено на станции, расположенной на р. Мойке. Турбогенераторы начали находить более регулярное применение в России.

Гидроэлектрические станции на рассматриваемом этапе развития средств производства электроэнергии заметного распространения не получили, хотя принципиальная воз-

можность и отдельные случаи сооружения таких станций имелись (рис. 6-26). Это легко объяснить затруднениями, связанными с передачей энергии на большие расстояния: если топливо можно было привезти к тепловым станциям с малым радиусом электроснабжения, то раскрепостить гидроэнергетику от сковывавших ее развитие местных условий могло только решение проблемы передачи энергии на расстояние.

Выше был уже отмечен наиболее существенный недостаток электроснабжения постоянным током: слишком малый радиус района, который может обслуживаться центральной электростанцией. Обычно этот радиус составлял несколько сотен метров. Электростанции являлись капиталистическими предприятиями, которые стремились расширить круг потребителей своего товара — электроэнергии. Этим объяснялись настойчивые поиски путей увеличения радиуса электроснабжения при условии сохранения уже построенных станций постоянного тока. Было найдено несколько путей увеличения радиуса распределения энергии.

Первая идея, не получившая заметного распространения, касалась понижения напряжения электроламп. Например, можно было увеличить длину магистрали и допустить при этом потерю напряжения до 45% вместо обычно принимавшихся 17%. Если бы при этом применялись лампы, рассчитанные на напряжение 110 в, то накал их был бы очень слабым. Поэтому предполагалось такие лампы включать только вблизи электростанции, а на периферии сети использовать лампы, изготовленные на пониженное напряжение, например, на привычное тогда напряжение 65 в. Подобный вариант обсуждался в 1889 г. в Москве, где планировалось снабжать энергией Георгиевской электростанции территорию Китай-города, и в Петербурге, где возникла необходимость проложить магистрали протяженностью до 1,5 км. Однако расчет показал, что и в том и в других случаях экономически оказывалось более выгодным построить новые электростанции.

Другим решением, которое могло во многих случаях удовлетворить потребность, было изменение схемы сети: переход от двухпроводных сетей к многопроводным, т. е. фактически к повышению напряжения.

Трехпроводная система распределения электроэнергии была предложена в 1882 г. Дж. Гопкинсоном и независимо от него Т. Эдисоном. При трехпроводной системе генераторы

на электростанции соединялись последовательно и от средней точки шел нейтральный или компенсационный провод (рис. 6-27). При этом сохранялись обычные лампы и они включались, как правило, между рабочими проводами и нейтральным, а двигатели в целях сохранения симметрии нагрузки можно было включать на повышенное напряжение (220 в). Если нагрузка в обеих ветвях трехпроводной системы была одинаковой, то в нейтральном проводе тока не было¹. В любом другом случае по нейтральному проводу протекал ток небаланса, который обычно был много меньше рабочего тока. Последнее обстоятельство давало

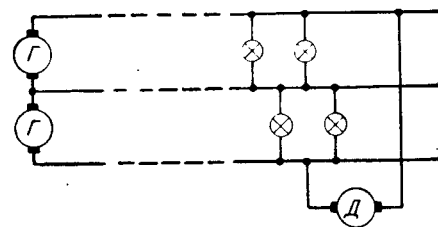


Рис. 6-27. Трехпроводная система распределения постоянного тока.

возможность принимать сечение нейтрального провода весьма малым (обычно $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{3}$ сечения крайнего провода). При этом не следует упускать из виду, что сечение крайних проводов тоже уменьшалось в сравнении с сечением проводов в двухпроводной системе. Это объяснялось тем, что при увеличении напряжения вдвое ток при той же мощности вдвое снижался, а потери, пропорциональные квадрату тока, снижались вчетверо. Практическими результатами введения трехпроводной системы явилось, во-первых, увеличение радиуса электроснабжения примерно до 1200 м, во-вторых, относительная экономия проводниковой меди (при всех прочих одинаковых условиях расход меди при трехпроводной системе был практически вдвое меньше, чем при двухпроводной системе).

Для регулирования напряжения в ветвях трехпроводной сети применялись различные устройства: включение регулировочных дополнительных генераторов, включение между диаметрально расположенными витками обмотки якоря

¹ Трехпроводная схема явилась как бы усовершенствованием применявшейся ранее схемы Свана, в которой нейтральный провод не доходил до генераторов и которая требовала, следовательно, поддержания строгой симметрии нагрузки.

Двухполюсного генератора индукционной катушки — делителя напряжения, в частности получившего значительное распространение делителя напряжения Доливо-Добровольского, включение аккумуляторных батарей (рис. 6-28).

Трехпроводная система нашла широкое распространение. Крупные масштабы ее применения имели место в Берлине. Две берлинские станции, построенные в середине 80-х годов, были со временем включены на совместную работу, и сеть станций была перестроена с двухпроводной на трехпроводную: Мощность потребителей, питавшихся от

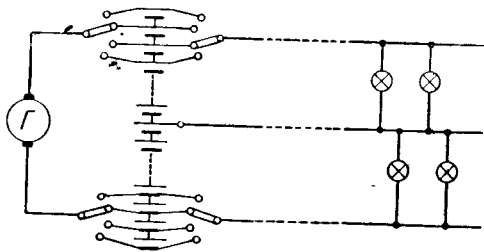


Рис. 6-28. Питание трехпроводной сети от одного генератора. В качестве делителя напряжения применена аккумуляторная батарея.

этих станций, в 1898 г. превысила 30 тыс. квт. Трехпроводные сети постоянного тока были построены также во многих других зарубежных городах и в России. Они сохранялись еще в значительном числе в 20-х годах текущего столетия, а в отдельных случаях применяются и в настоящее время.

Максимальным вариантом многопроводных систем являлась пятипроводная сеть постоянного тока. При этом применялись четыре последовательно включенных генератора и напряжение увеличивалось вчетверо. Экономия в проводниковой меди была весьма большой, а радиус электроснабжения возрастал до 1 500 м. Однако сравнительно незначительное увеличение радиуса электроснабжения достигалось в этом случае за счет существенного усложнения сети, повышения напряжения до опасных пределов, усложнения регулирования равномерности нагрузки отдельных ветвей. Поэтому пятипроводная система не получила широкого применения, хотя ее автор, В. Сименс, предполагал, что пятипроводная система будет с успехом конкурировать с системами переменного тока.

Третий путь увеличения радиуса электроснабжения

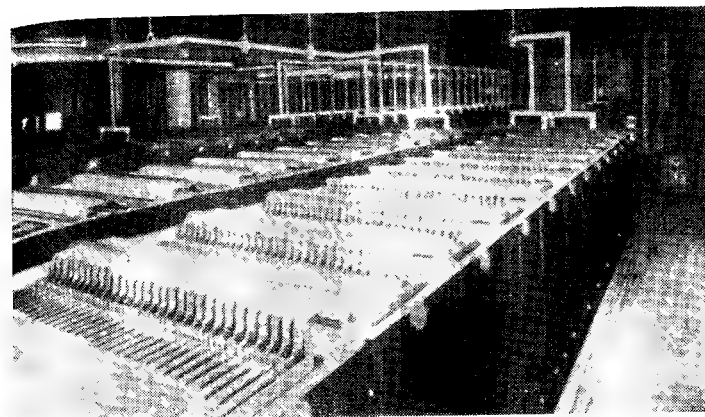


Рис. 6-29. Аккумуляторная батарея на электростанции постоянного тока.

предполагал сооружение аккумуляторных подстанций. Аккумуляторные батареи были в то время обязательным дополнением каждой электростанции. Они покрывали пики нагрузок, заряжаясь в дневные и поздние ночные часы, и служили резервом. Для аккумуляторных батарей, так же как и на современных электростанциях (где, впрочем, эти батареи выполняют иные функции — питание цепей управления, защиты, автоматики и аварийного освещения), отводилось специальное обширное помещение. На рис. 6-29 показана аккумуляторная батарея на электростанции, сооруженной в 1896 г.

Для увеличения радиуса электроснабжения аккумуляторные батареи устанавливались на подстанциях в двухпроводных сетях постоянного тока. Эти подстанции сооружались вблизи потребителей, которые находились на значительном удалении от центральной станции. Группы аккумуляторных батарей, соединенные последовательно, заряжались от центральной станции при двойном напряжении, а при параллельном соединении они питали местную нагрузку.

Сети с аккумуляторными подстанциями получили некоторое применение. В Москве, например, была построена в 1892 г. аккумуляторная подстанция в Верхних торговых рядах (ныне ГУМ), находившаяся на расстоянии 1 385 м от Георгиевской центральной станции. На этой подстанции были установлены аккумуляторы, питавшие около 2 000 ламп накаливания.

Кроме указанных путей увеличения радиуса электроснабжения, иногда пользовались схемами последовательного присоединения потребителей (например, в Петербурге лампы уличных фонарей включались последовательно в сеть 500 в) или последовательно-параллельного присоединения потребителей (напряжением до 2000 в). При последовательном присоединении поддерживалась постоянная величина тока (обычно 10 а), а напряжение регулировалось в зависимости от нагрузки. Сети электрических станций постепенно расширялись и усложнялись, число потребителей быстро росло. Так, от сети Миланской электростанции постоянного тока в 1888 г. питалось свыше 11 тыс. ламп.

В последние два десятилетия прошлого века было построено много электростанций постоянного тока, и они долгое время давали значительную долю общей выработки электроэнергии.

Мощность электростанций постоянного тока редко превышала 500 квт, а агрегаты обычно имели мощность до 100 квт.

Развитие электростанций переменного тока

Все возможности увеличения радиуса электроснабжения при постоянном токе довольно быстро были исчерпаны. Многопроводные сети и сети с аккумуляторными подстанциями могли уже удовлетворять потребности малых и средних городов, но совершенно не отвечали нуждам крупного города. Техника постоянного тока в системе электроснабжения изживала себя.

В 80-х годах начали строить станции переменного тока, выгодность которых с точки зрения увеличения радиуса электроснабжения была бесспорной (трансформатор был уже изобретен), а проблема силовой нагрузки еще не приобрела существенной значимости.

Если не считать блок-станций переменного тока, построенных в Англии в 1882—1883 гг., когда появились трансформаторы Голяра и Гиббса, то, по-видимому, первой постоянно действовавшей электростанцией переменного тока можно считать станцию Гровнерской галереи (Лондон). На этой станции, пущенной в эксплуатацию в 1884 г., были установлены два генератора переменного тока Сименса, которые через последовательно включенные трансформаторы Голяра и Гиббса питали освещение галереи. Недостатки последовательного включения трансформаторов и, в частности, трудности поддержания постоянства величины тока

были выявлены довольно быстро, и в 1886 г. эта станция была реконструирована по проекту видного английского инженера С. Ц. Ферранти. Генераторы Сименса были заменены машинами конструкции Ферранти мощностью каждая 1 000 квт с напряжением на зажимах 2,5 кв. Новые, изготовленные по проекту Ферранти трансформаторы включались теперь уже в цепь параллельно и служили для снижения напряжения в непосредственной близости от потребителей.

В 1889—1890 гг. Ферранти вновь вернулся к проблеме электроснабжения Лондона. На этот раз была поставлена задача обеспечить электроэнергией весь район лондонского Сити. Но поскольку компания, финансировавшая работы, не соглашалась оплатить высокую стоимость земельного участка в центре города, Ферранти выбрал место для новой центральной электростанции в одном из предместий Лондона, в Дептфорде, находящемся в 12 км от Сити. Построить электростанцию на таком большом расстоянии от места потребления электроэнергии можно было только при условии, что она будет вырабатывать переменный ток. При сооружении этой установки были применены очень высокие по тому времени параметры. На Дептфордской электростанции были установлены генераторы мощностью по 1 000 л. с. с напряжением 10 кв, причем в отличие от старых генераторов, которые приводились в движение от паровой машины при помощи канатной передачи, новые генераторы были непосредственно соединены с быстроходными вертикальными паровыми машинами¹. Быстроходность паровых двигателей все же сильно отставала от быстроходности электрогенераторов. Этим, в частности, объясняется своеобразная конструкция электрических генераторов того времени, имевшая отношение длины генератора к его диаметру, резко отличавшееся от этого отношения у генераторов, приводимых в движение паровыми турбинами. Характерные для того периода генераторы большого диаметра с малой длиной сохранились в настоящее время на гидростанциях с относительно тихоходными водяными турбинами в качестве первичного двигателя. Общая мощность Дептфордской станции составляла около 3 000 квт. На четырех городских подстанциях, питавшихся по четырем магистраль-

¹ То же самое сделал, как указывалось выше, Т. Эдисон еще в 1882 г. Но в дальнейшем желание увеличить скорость генераторов, а при переменном токе — и двигателей заставляло нередко вновь возвращаться к менее надежной ременной или канатной передаче.

ным кабельным линиям, напряжение понижалось до 2400 в, а затем уже у потребителей (в домах) напряжение понижалось до 100 в.

Примером крупной гидростанции однофазного тока, питающей осветительную нагрузку, может служить американская станция, построенная в 1889 г. на водопаде вблизи Портленда. На этой станции гидравлические двигатели приводили в действие восемь однофазных генераторов общей мощностью 720 квт. Кроме того, на станции были установлены 11 генераторов, предназначенных специально для питания дуговых ламп (по 100 ламп на каждый генератор). Энергия этой станции передавалась на расстояние 14 миль в Портленд. На рис. 6-30 показаны оборудование и линия рассматриваемой электростанции.

Характерной особенностью первых электростанций переменного тока являлась изолированная работа отдельных машин. Синхронизация генераторов еще не производилась, и от каждой машины шла отдельная цепь к потребителям. Легко понять, насколько неэкономичными при таких условиях оказывались электрические сети, на сооружение которых расходовались колоссальные количества проводниковой меди и изоляторов.

В России крупнейшие станции однофазного тока были построены в конце 80-х и начале 90-х годов. С 1887 г. электростанция однофазного тока работала в Одессе: от сети переменного тока напряжением 2000 в через трансформаторы питались электролампы, установленные в театре и у частных потребителей. В том же году началась эксплуатация электростанции постоянного тока в Царском Селе (ныне г. Пушкин). Протяженность воздушной сети в Царском Селе уже в 1887 г. была около 64 км, тогда как 2 года спустя кабельная сеть «Общества 1886 г.» в Москве и Петербурге, вместе взятых, составляла только 115 км. В 1890 г. Царскосельская станция и сеть были реконструированы и переведены на однофазный переменный ток напряжением 2 кв. По свидетельству современников Царское Село было первым городом в Европе, который был освещен исключительно электричеством.

Крупнейшей в России электростанцией однофазного тока была построенная в 1894 г. инж. Н. В. Смирновым станция на Васильевском острове в Петербурге. Мощность ее составляла 800 квт и превосходила мощность любой существовавшей в то время станции постоянного тока. В качестве первичных двигателей использовались четыре верти-

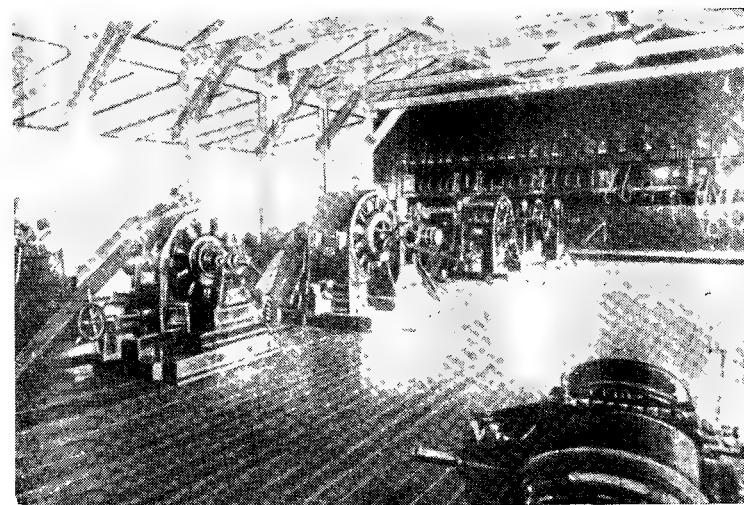


Рис. 6-30. Гидростанция однофазного тока и линия электропередачи (Портленд, США).

кальные паровые машины компаунд мощностью 250 э. л. с. каждая с давлением пара 13 ат. Каждый из шестиводотрубных котлов имел поверхность нагрева 150 м². Применение переменного тока напряжением 2000 в позволило упростить и удешевить электрическую сеть (сечение прово-

дов 58 мм^2 вместо обычных $400\text{--}600 \text{ мм}^2$ в сетях постоянного тока) и увеличить радиус электроснабжения (более 2 км при потере до 3% напряжения в магистральных проводах вместо $17\text{--}20\%$ в сетях постоянного тока). Василеостровская станция служила в свое время образцом для сооружения центральных электростанций. Она работала в Петербурге до 1908 г., затем была переведена в Ростов-на-Дону и работала там до середины 30-х годов.

Таким образом, опыт эксплуатации центральных станций и сетей однофазного тока показал преимущества переменного тока, но вместе с тем выявил ограниченность применения однофазного тока. Этот род тока мог применяться до тех пор, пока остро не вставал вопрос о питании электроэнергией, кроме осветительной еще и силовой нагрузки. Однофазная система тормозила развитие электропривода, усложняла его. Так, например, при подключении к сети Дептфордской станции силовой нагрузки приходилось дополнительно помещать на валу каждого синхронного однофазного двигателя еще разгонный коллекторный двигатель переменного тока. Легко понять, что такое усложнение электропривода делало весьма сомнительной возможность его широкого применения.

Новый, современный этап в развитии электроэнергетики начался в связи с возникновением техники трехфазного тока. Возможности развития электропривода, которые появились вместе с изобретением асинхронного трехфазного двигателя, а также дальнейшее развитие электростанций и сетей переменного тока будут рассмотрены ниже.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

РАЗВИТИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

7-1. ВВЕДЕНИЕ

Общее развитие теплоэнергетики во второй половине XIX в. характеризуется дальнейшим укреплением позиций паровой машины как универсального двигателя крупной машинной индустрии, транспорта и — в известной степени — сельского хозяйства (локомотивы). Параллельное развитие двигателей внутреннего сгорания, начавшееся с середины XIX в., к концу его еще не привело к сколь-либо ощутимой доле этих двигателей в общем энергетическом балансе мира. Возникшие в последней четверти XIX в. двигатели высокого сжатия (дизели) и паровые турбины только подго-

товили почву для становления новых отраслей энергетики в XX в., а газовая турбина не выходила из стадии ранних малоэффективных попыток ее осуществления.

Таким образом, XIX в., начиная с 1800 г., когда окончание действия патентов Уатта развязало руки конструкторам и изобретателям паровых котлов и машин, и кончая 1899 г., когда была введена в эксплуатацию первая тепловая турбинная электростанция трехфазного тока, явившаяся началом возникновения комплексной энергетики XX в., был веком почти монопольного господства в энергетике поршневой паровой машины.

Паровая машина сыграла громадную историческую роль в развитии производительных сил общества. Процесс развития паросиловой установки с поршневым паровым двигателем в течение всего XIX в. носил преимущественно количественный характер, находивший свое отчетливое отражение в росте установленной мощности. Что касается основных конструктивных элементов паровой машины и термодинамических основ ее работы, то они совершенствовались в течение всего XIX в. без каких-либо коренных качественных изменений. Это не означает, что технические показатели паровых машин стабилизировались, что качество их оставалось без изменения при интенсивном количественном росте. Качественные показатели все время возрастали. Возрастают показатели интенсивности: давление и перегрев пара, число оборотов, удельные тепловые и силовые нагрузки, напряженности топочных объемов и поверхностей нагрева, скорости движения и т. д. Возрастал и показатель степени использования возможностей, заключающихся в природных свойствах теплоты и рабочих тел, — к. п. д.

Рассмотрим отдельно процесс развития основных элементов универсальной паросиловой установки во второй половине XIX в.: паровых котлов и паровых машин.

7-2. РАЗВИТИЕ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XIX в.

Во второй половине XIX в. практическое котлостроение выработало достаточно экономичные и надежные парогенераторы, которые не только удовлетворяли потребности стационарной и транспортной энергетики рассматриваемого периода, но и служили базой для последующего постепенного перехода от паропроизводительности в десятки тонн пара в час до сотен тонн. Такой рост паропроизводительности

потребовался в связи с ростом масштабов энергоснабжения в условиях развитой электрификации в XX в.

К этому времени практика котлостроения под воздействием требований на всемерное повышение давления пара и производительности котлов неизбежно привела к единственной рациональной принципиальной основе конструирования парового котла в виде той или иной комбинации стальных тонкостенных труб небольшого диаметра. Эти трубы позволяют при толщине стенки 3—4 мм выдерживать

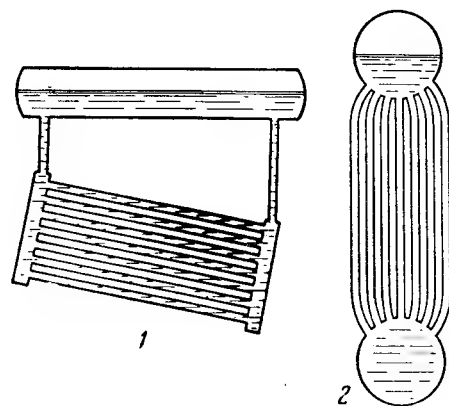


Рис. 7-1. Принципиальные конструктивные схемы водотрубных котлов.

1 — горизонтальный; 2 — вертикальный.

очень высокие давления. Потребная же производительность может быть достигнута за счет суммарной длины труб, входящих в конструкцию котлоагрегата. Таким образом, тонкая стальная труба в качестве основного конструктивного элемента котла была в состоянии удовлетворять двум основным тенденциям развития паротехники: увеличению давления и производству больших количеств пара.

К середине XIX в. сложился конструктивный тип парового котла с пучком прямых слегка наклонных труб, вальцованных в плоские стенки двух камер (рис. 7-1), получивший название «горизонтального» водотрубного котла. К концу XIX в. стремление увеличить удельную паропроизводительность паровых котлов судовых установок привело к разработке другого типа водотрубных котлов, названных «вертикальными», основным элементом которого явил-

ся вертикальный или близкий к вертикальному пучок труб, вальцованный в цилиндрические стенки барабанов.

Оба типа котлов заключали в себе возможности для значительного увеличения поверхности нагрева за счет удлинения труб, увеличения числа труб в пучке, числа коллекторов и барабанов. Что касается повышения котельного давления, то здесь более перспективными оказались «вертикальные» котлы с их барабанами, лучше сопротивляющимися давлению, чем плоские стенки камер.

Рассмотрим отдельно основные этапы развития «горизонтальных» и «вертикальных» водотрубных котлов.

Горизонтальные
и вертикальные
котлы

Начиная с середины XIX в., двухкамерный котел получил широкое развитие и значительное число западноевропейских заводов выпускало двух-

камерные котлы, отличавшиеся друг от друга лишь некоторыми несущественными деталями. Очевидным недостатком двухкамерных котлов являлось наличие плоских стенок, плохо выдерживавших высокие давления и требовавших для своего укрепления множество связей, которые затрудняют очистку котла от накипи и вызывают температурные напряжения. С этим недостатком можно было мириться, пока давление колебалось в пределах 3—8 атм. Типичным представителем двухкамерных котлов может служить выпускавшийся в Германии котел Штейнмюллера (рис. 7-2) с ручной топкой для угля, характерным расположением пароперегревателя, допускавшим регулирование перегрева заслонкой, расположением поперечных газопроводов и выводом топочных газов в подземный боров.

С повышением давления пара настоятельно потребовалось новое решение, которое было в принципе найдено в виде разделения камер на секции, благодаря чему допускалось более свободное тепловое расширение конструкции котла и появлялась возможность выдерживать большее давление. В некоторых конструкциях (котлы Бабкок-Вилькокс, Шухова) в каждую отдельную секцию вальцовывалось по нескольку труб. В других конструкциях (котлы Бельвиля, Долголенко, Рута, Шмидта) секции сводились к небольшим коробкам, предусматривавшим вальцовку в них только двух труб, соединявшихся посредством этих коробок.

Одним из ранних высококачественных секционных водотрубных котлов явился котел фирмы Бабкок-Вилькокс, разработка которого, по данным фирмы, прошла 20 этапов

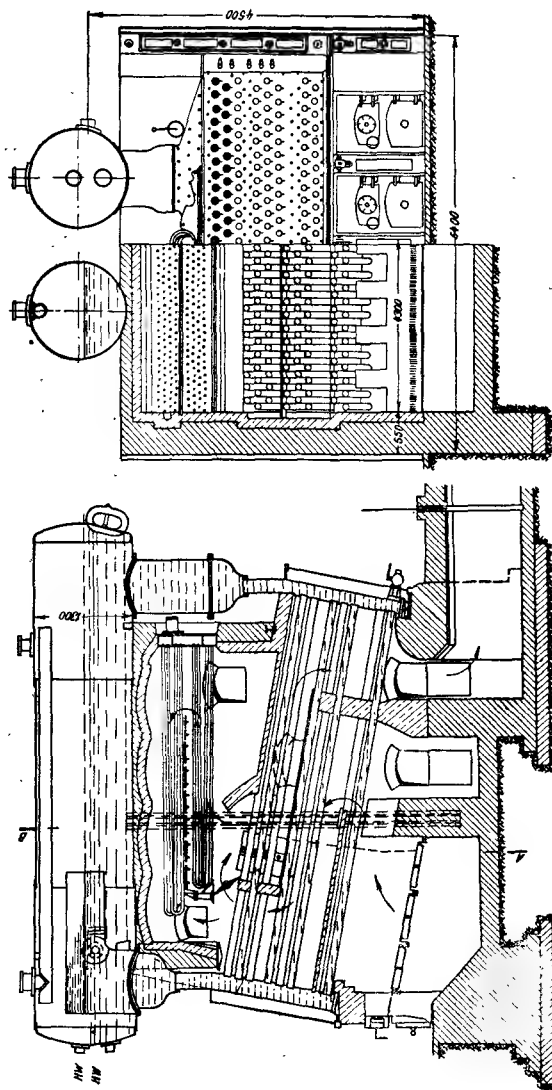


Рис. 7-2. Горизонтальный водотрубный двухкамерный паровой котел с плоскими камерами — один из многих вариантов котлов данного типа.

постепенного приближения к наилучшему решению. В конструктивной форме, близкой к той, которая принесла этому котлу мировую известность, он был впервые продемонстрирован на Парижской выставке в 1867 г. (рис. 7-3).

Другим секционным котлом с пучками параллельных труб, получившим преимущественное распространение в России и вызвавшим подражания за рубежом нашей страны, явился котел конструкции В. Г. Шухова, запатен-

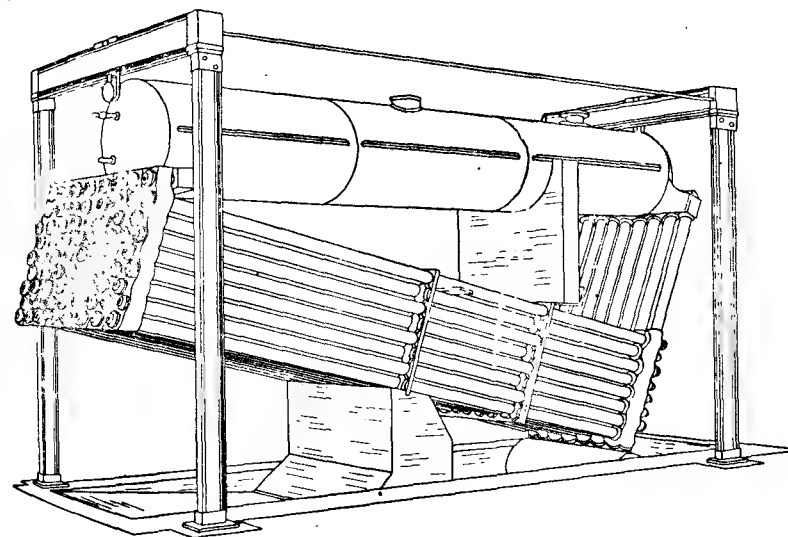


Рис. 7-3. Схематический рисунок горизонтального водотрубного парового котла системы фирмы „Бабкок-Вилькокс“ с вертикальными змееобразными секциями.

тованный им в 1896 г. (рис. 7-4). В том же году он демонстрировался на Всероссийской выставке в Нижнем Новгороде. В котле Шухова каждая отдельная секция представляла собой пучок из 19—21 труб, ввальцованных в короткие барабаны с легко снимающимися крышками, что позволяло иметь свободный доступ сразу к трубам всего пучка. Шухов разработал оригинальную конструкцию соединения секций посредством болтов, что давало возможность из отдельных пучков (по два пучка по вертикали и по два — четыре пучка по горизонтали) составлять котлы с поверхностью нагрева 50—300 м². Разборный котел Шухова был транспортабельным, отличался невысокой стоимостью и малой металлоемкостью.

В патентной заявке на свой водотрубный котел Шухов писал: «...В случае надобности, обмуровка таких котлов заменяется особою одеждою, состоящей из циркулярных труб. Такая одежда образует топочное пространство, в котором помещается котел». Приведенный текст показывает, что Шуховым впервые был предложен топочный экран, получивший в наше время широкое применение.

Взгляд и разработанные конструкции, опережавшие современную ему технику, характерны для творчества В. Г. Шухова и вытекают из постоянно применявшегося в его научно-инженерной деятельности творческого метода, который и в наше время может служить хорошей школой для инженеров. Сущность применявшегося Шуховым метода в самом кратком виде может быть выражена простым указанием на следующие последовательные приемы: 1) четкая постановка задачи, вытекающая из ее целевого назначения; 2) выделение главных, определяющих элементов искомого решения; 3) точное выражение характера связи между определяющими элементами в виде математического уравнения; 4) выделение в качестве произвольно изменяемого аргумента того элемента, с изменением которого изменяется экономический эффект решения;

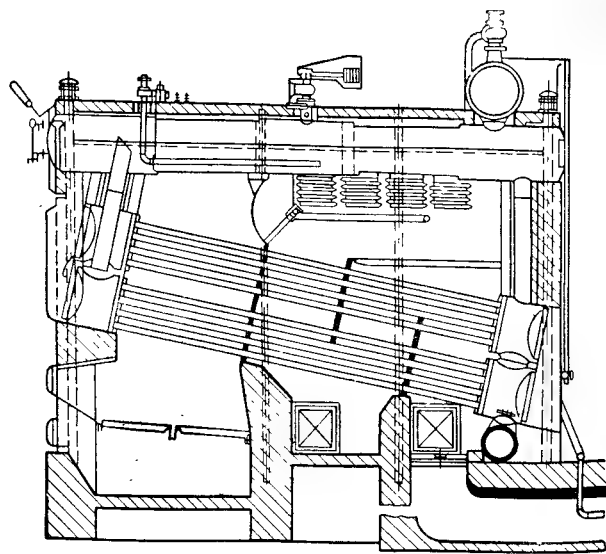


Рис. 7-4. Секционный горизонтальный водотрубный котел системы В. Г. Шухова с цилиндрическими коллекторами-барабанами, являющимися отдельными секциями котла.

5) математическое решение выведенного уравнения для частной формы, определяемой максимумом экономической эффективности; 6) приведение найденных решений к форме, доступной и удобной для использования на производстве; 7) дополнение найденного наиболее эффективного решения практическими нормами и коэффициентами; 8) доведение результатов всей работы до завершенной технической формы — до рабочего чертежа, графика, таблицы величин.

Судовые паровые котлы, к которым предъявлялось требование более высокой удельной паропроизводительности (как на единицу поверхности нагрева котла, так и на единицу его веса и объема), сыграли существенную роль в подготовке производства паровых котлов к решению тех задач, которые возникли в XX в. в связи с начавшейся эрой электрификации. Судовые котлы развивались по нескольким направлениям. Первое из них довольно быстро завершилось построением огнетрубного шотландского парового котла, с максимумом давления пара 16—20 ат. Водотрубные судовые котлы, так же как и стационарные, подразделялись на «горизонтальные» и «вертикальные».

Наиболее распространенным горизонтальным котлом являлся котел французской фирмы Бельвиль, в значительной степени усовершенствованный русским конструктором В. Я. Долголенко. Последний, обратив внимание на недостаточность циркуляции в котлах Бельвиля, настолько их усовершенствовал, что получил привилегию на морской водотрубный котел (рис. 7-5), отличавшийся весьма надежной циркуляцией.

Представителем группы вертикальных судовых паровых котлов может служить котел Ярроу, показанный на рис. 7-6 без обмуровки. Удобное расположение топки под «шатром» труб, надежная циркуляция и высокая удельная паропроизводительность обеспечили этому котлу широкое распространение в судовых установках и вместе с другими конструкциями «вертикальных» судовых паровых котлов способствовали возникновению и быстрому развитию «вертикальных» котлов в стационарных установках.

В качестве одного из примеров стационарных вертикальных котлов может служить четырехбарабанный водотрубный котел, предложенный американцем Стирлингом в 1894 г. (рис. 7-7). Возможное разнообразие компоновок котлов такого типа, состоящих из трех, четырех, пяти и шести барабанов, выделение последнего пучка в качестве

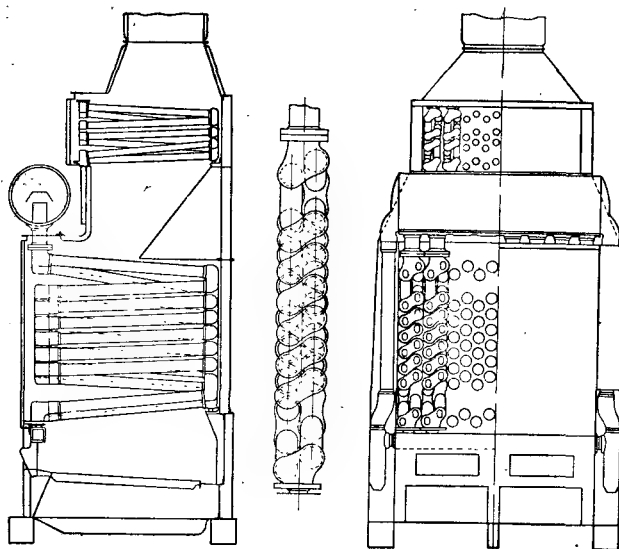


Рис. 7-5. Судовой водотрубный котел системы В. Я. Долголенко.

Над топкой котла расположены двухрядные зигзаги из прямых труб, ввальцованных в литые коробки. Между двумя проекциями котла показан один такой зигзаг труб в увеличенном масштабе.

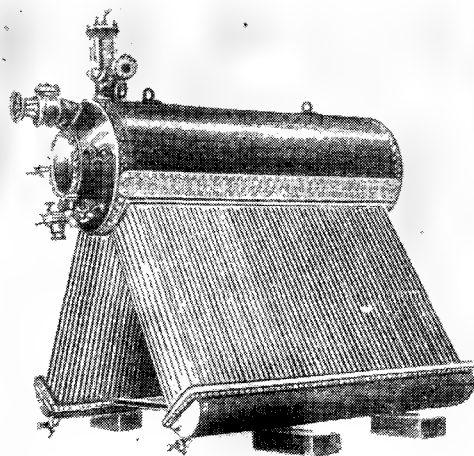


Рис. 7-6. Судовой котел с прямыми трубками системы Ярроу (без обмуровки).

экономайзера, удобное расположение пароперегревателя между первым и вторым пучками (по ходу газов) сделали котлы такого типа весьма распространенными, а некоторые их конструктивные элементы сохранились и в современном котлостроении.

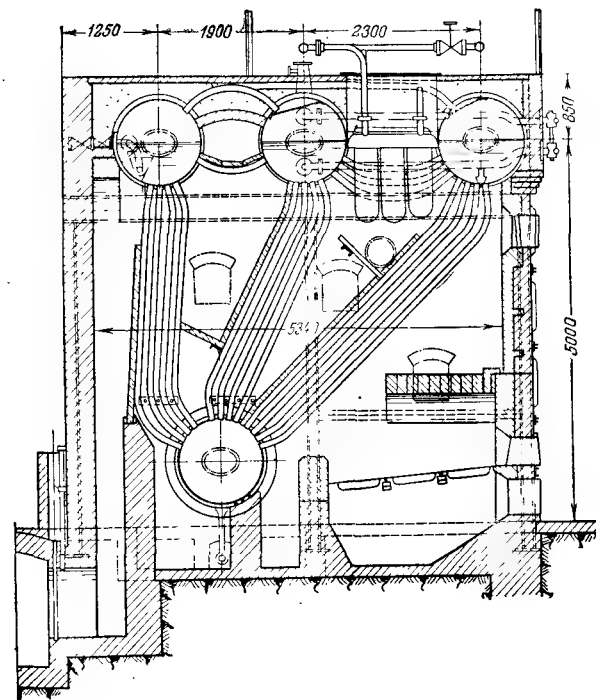


Рис. 7-7. Вертикальный водотрубный котел Стирлинга с четырьмя барабанами.

Одновременно с котлом Стирлинг в Германии начал заметно распространяться вертикальный водотрубный котел Гарбе, отличавшийся прямыми трубками (рис. 7-8) и допускавший при многобарабанном выполнении те же возможности в компоновках, что и котел Стирлинга.

К концу XIX в. водотрубные паровые котлы позволяли в отдельных конструкциях получать суммарную поверхность нагрева свыше 500 м² и суммарную паропроизводительность свыше 20 т/ч пара. Однако задача повышения паропроизводительности не могла

Повышение
паропроизводительности
котлов

быть решена простым увеличением поверхности нагрева. Существенную роль здесь сыграло увеличение удельной (с 1 м²) паропроизводительности, которая к середине XX в. возросла в среднем в 10 раз. В рассматриваемый период

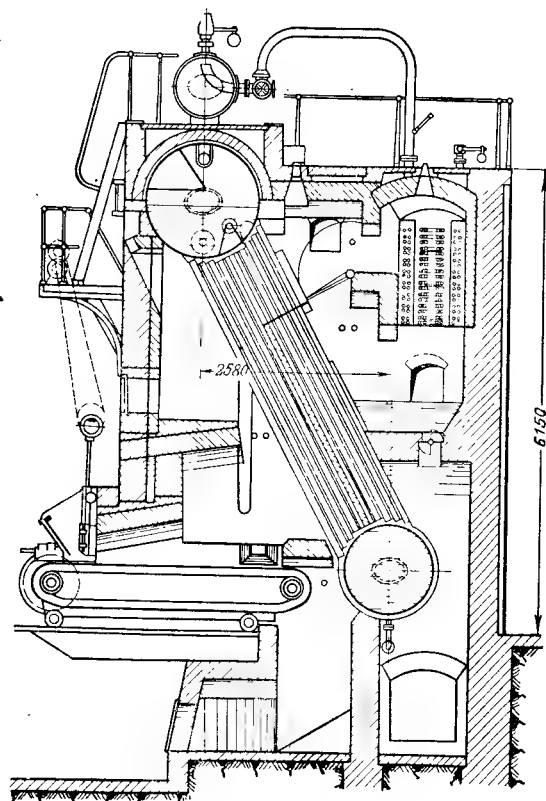


Рис. 7-8. Вертикальный водотрубный котел Гарбе с прямыми трубами и двумя барабанами.

Регулирование перегрева пара осуществляется применением поворачивающейся заслонки

проблема повышения удельной паропроизводительности только возникала; вместе с ней возникал и ряд вопросов, позволявших позднее обеспечить получение высокой удельной производительности.

В своей основе котельные установки второй половины XIX в. не выходили за рамки потребностей фабрично-за-

водской энергетики. Так, например, данные по одной из развитых капиталистических стран конца XIX и начала XX вв. — Германии — показывают следующее распределение 47 807 работавших паровых котлов по их величине:

0—50 м ²	51%
50—100 м ²	35,7%
100—200 м ²	10,3%
200 и выше	3,0%

Таким образом, свыше 85% котлов имело среднюю производительность порядка 1 т пара в час, способную обеспечить паром силовую установку мощностью менее 200 л. с. Таковы общие характеристики передовой котельной техники конца XIX в. По этим данным суммарная мощность всех паросиловых установок Германии (кроме транспортных) составляла величину порядка 100 000 л. с., т. е. была меньше мощности одной и притом не самой крупной турбины середины XX в.

Использование жидкого топлива

Однако и в таком небольшом на современный взгляд объеме теплоэнергетика конца XIX в. создавала достаточно точную базу для творческих исканий ученых и инженеров. Одной из интересных и перспективных областей подобных исследований является использование жидкого топлива. Отдельные опыты в этом направлении не приводили к желаемым результатам. Они сводились либо к разбивке струи жидкого топлива на отдельные тонкие струйки и капли, либо к попыткам «фитильного» сжигания путем пропитки жидким горючим пористых огнеупоров, либо, наконец, к предварительному испарению жидкого горючего до его поступления в топку. Последнее предложение приводит к весьма взрывоопасным конструкциям, первые же не были в состоянии обеспечить надежное смешивание воздуха — окислителя — с топливом.

Ведущая роль в разработке устройств для сжигания жидкого горючего принадлежала России в силу ряда объективных условий, основным из которых являлось богатство нашей страны ресурсами нефти¹. В основу конструкций нефтяных форсунок русские изобретатели положили выдвинутый в 1867 г. А. И. Шпаковским принципиально новый способ сжигания жидкого топлива в мелкораспыленном

¹ Добыча и переработка нефти в России была начата еще в 1823 г. братьями Дубиниными в районе Грозного.

состоянии, получающемся путем пульверизации нефти струей пара. Этот способ получил практическое подтверждение при испытаниях пожарного катера «Русская», проведенных на р. Неве в 1867 г.

В конце XIX и начале XX вв. в России были разработаны самые разнообразные типы форсунок. Одна из наиболее рациональных конструкций была предложена В. Г. Шуховым и применяется до настоящего времени. Использовались также форсунки С. Данилина, отличавшиеся внутренним подводом пара, форсунки О. К. Ленца с плоским факелом, форсунка В. И. Береснева с равномерно распространенным во все стороны плоским факелом, бесшумная форсунка конструкции Е. И. Иванова, механическая форсунка Тентелевского завода, отличающаяся от паровых тем, что в ней распыление осуществлялось не струей пара, а нагнетанием нефти насосом через ряд винтовых каналов.

Отмечая успешное сжигание нефти в форсунках, инж. С. Гулишамбаров утверждал в 1880 г., что «... в деле нефтяного отопления Россия далеко оставила за собою все остальные государства, и наши приборы для этой цели постоянно служат предметом удивления американцев, приезжающих в Баку». О нефтяном отоплении паровых котлов, представленных на промышленной выставке в 1896 г., проф. Г. Ф. Дени писал, что оно «... составляет славу русской земли, русского ума, русского труда».

Другие работы по усовершенствованию котлов

Была проделана работа по снижению взрывоопасности паровых котлов. В этой работе русские техники занимали ведущее место. Требование снабжать котлы проверенным манометром с красной чертой на шкале против предельно допускаемого давления было впервые выдвинуто в «Проекте правил, подлежащих соблюдению при употреблении паровых котлов», разработанном в России в 1868 г. С уменьшением водяного объема паровых котлов взрывобезопасность их уменьшалась, но вместе с тем усложнилась эксплуатация, в частности поддержание уровня воды в должном положении, что уже в 1877 г. отметил проф. И. А. Вышнеградский, классифицируя котлы по их аккумулярующей способности.

Следует указать, что отставание России в темпах капиталистического развития по сравнению с рядом других стран сказалось на отечественном котлостроении. В странах Западной Европы и США котлостроение во второй

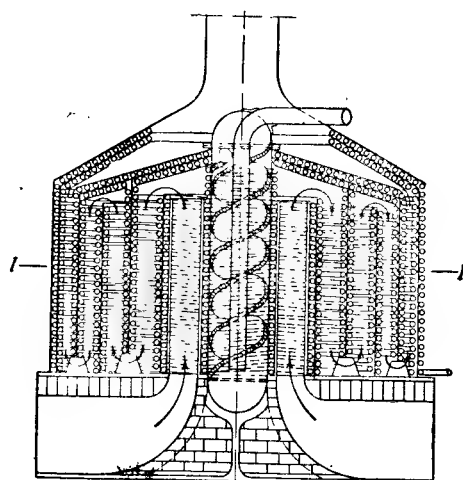
половине XIX в. было сосредоточено в небольшом числе крупных предприятий и осуществлялось на специализированных и хорошо оборудованных заводах. В этих условиях обеспечивался большой выпуск серийной продукции на мировой рынок, но вместе с тем мало стимулировалась творческая мысль отдельных новаторов, предложения которых омертвлялись крупными котлостроительными фирмами. Поэтому многие имена зарубежных новаторов, как и предлагавшиеся ими конструкции, остаются неизвестными, скрытыми в архивах капиталистических фирм.

В отстававшей России к концу XIX в. существовало 118 предприятий, выпускавших котлы, но ни одно из них не было полностью специализированным. Много котлов строилось по единичным проектам, по частным заданиям, в выполнении которых зачастую находили свое выражение передовые идеи отдельных конструкторов и изобретателей, решавших те или иные проблемы котлостроения.

Проблемой надежной циркуляции воды в паровых котлах успешно занимался строитель многих судовых котлов и паровых машин В. И. Калашников. Им была получена привилегия на вертикальный водотрубный котел с «полной циркуляцией», которая означала участие в циркуляционном движении всей проходящей через котел воды за счет одной естественной циркуляции.

К прогрессивной идее прямоточного котла с принудительной циркуляцией под действием питательных насосов пришли изобретатели П. Кузьминский и Н. Пашинин, получившие привилегию на «паропроизводитель», названный ими так потому, что «котел» как сосуд в их конструкции отсутствовал (рис. 7-9). Этот паропроизводитель не имеет радиационной части поверхности нагрева. Конвективная часть представлена змеевиками, образующими дымоходы котла таким образом, что сечение дымохода постепенно суживается, обеспечивая постоянную скорость газов по мере их охлаждения. В центральном вертикально расположенном барабане-паросборнике предусмотрено устройство спирального сепаратора пара.

В своем одновитковом прямоточном котле судового назначения Д. И. Артемьев, наоборот, применил экранный принцип (рис. 7-10), ограничив топочный объем с вертикальным факелом горения нефти сплошной одновитковой спиралью — экраном. Как экран, так и прямоточный принцип, примененные изобретателем, явились исключительно



Разрез по I-I

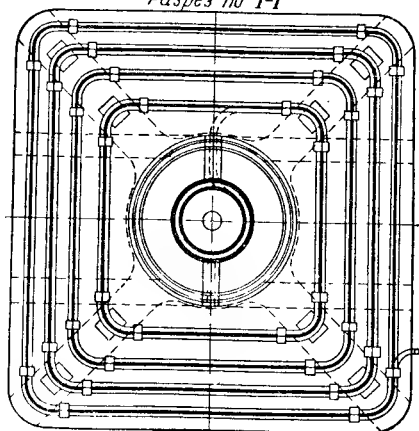


Рис. 7-9. Прямоточный паровой котел по патенту Кузьминского и Пашинина с принудительной циркуляцией в контуре котла.

Путь газов показан стрелками; в центре котла расположен спиральный сепаратор пара.

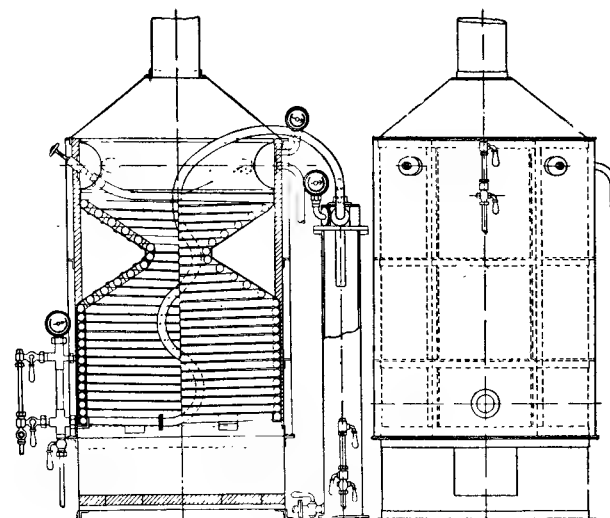


Рис. 7-10. Прямоточный одновитковый судовой котел конструкции Д. И. Артемьева.

Вода нагнетается в кольцевой коллектор-подогреватель и по одной спиральной трубке движется вниз; пар по волнообразной трубке, расположенной по оси котла и являющейся продолжением зоны перегрева, поступает в водоотделитель.

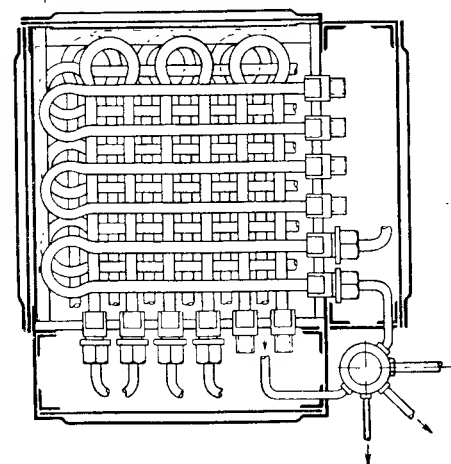


Рис. 7-11. Горизонтальный разрез через прямоточный паровой котел конструкции В. В. Табуревича.

Горизонтальные ряды труб расположены «крест-накрест», что вызывает сильную искусственную турбулизацию газового потока и сильно увеличивает теплопередачу.

смелым решением, противоречащим господствовавшим в то время взглядам.

Секционный котлоагрегат конструкции В. В. Табулевича (рис. 7-11), совершенно свободный от температурных напряжений, легко монтируемый и разбивающий газовый поток на ряд струй с высокой искусственной турбулизацией, показал при испытаниях на судне ряд положительных качеств.

Как видно из приведенных примеров, некоторые тенденции современного котлостроения уже проявлялись в передовых работах конца XIX и начала XX вв.

Теория котлоагрегатов

Разница в степени капиталистического развития между Россией и рядом других капиталистических стран сказывалась и в области теоретических исследований по паровым котлам. За рубежом в условиях фирменных битв за рынки единственным стимулом технического прогресса являлось стремление к прибылям, а основным методом — разрозненные опытные искания, обобщению которых в теорию мешала обособленность конкурировавших друг с другом фирм, свято хранивших производственные тайны и оберегавших свои патенты. Поэтому часто возникали многочисленные варианты наиболее удачных запатентованных конструкций, иногда значительно худшие, чем оригинал, о которых проф. МВТУ А. П. Гавриленко писал: «... можно встретить множество конструкций паровых котлов, но причиной появления большинства из них было желание обойти патент ранее построенного котла». Между наукой, направленной на раскрытие законов природы, и техникой, направленной на их использование в производстве, обнаружился существенный разрыв.

В России описанные условия сказывались значительно слабее. Поэтому не случайно появление в России ряда теоретических работ обобщающего характера, отходящих от заводской эмпирики и направленных на объяснение процессов, происходящих в теплотехнических устройствах и аппаратах.

Еще в 1864 г. в России была опубликована работа по исследованию причин естественной тяги в паровых котлах, проведенная И. П. Алымовым, в которой были установлены основные взаимосвязи факторов, определяющих силу тяги.

Парообразование и механизм получения пароводяной смеси были исследованы проф. Н. П. Петровым, автором

гидродинамической теории смазки. «Курс паровых котлов» Н. П. Петрова явился энциклопедией котельной техники, затрагивавшей и научно разрешавшей почти все основные проблемы построения и эксплуатации паровых котлов того времени.

Вопросы естественной циркуляции в паровых котлах предстали в новом, более правильном освещении после исследования проф. А. И. Предтеченского, писавшего, что им «... обращено особое внимание на вопрос о конструировании котла, как физического прибора, на выяснение вопроса, какие физические явления происходят внутри котлов».

В 1893 г. по заданию Петербургского металлического завода (ныне ЛМЗ) инженер-технолог В. Сазонов провел глубокое экспериментальное исследование циркуляции, результаты которого были опубликованы отдельным оттиском по распоряжению Русского технического общества, как представляющие большой теоретический и практический интерес.

В своих научных докладах Обществу морских инженеров в 1897 г. А. Погодин на специальных моделях наглядно демонстрировал исследованный им механизм циркуляции пароводяной смеси. В результате своей работы А. Погодин вывел уравнение подъемной силы парового пузыря и сопротивления среды его движению и составил общее уравнение полезного напора в циркуляционном контуре.

Теорию самотяги, разработка которой была начата И. П. Алымовым, развил и углубил для условий задачи о наивыгоднейшей температуре уходящих газов М. Н. Демьянов в 1887 г.

Значительное развитие общей теории паровых котлов было дано в многочисленных работах проф. Г. Ф. Делпа, на которых воспитывалось много русских инженеров-теплотехников и которые представляли собой фундаментальный труд, созданный в результате громадного и всестороннего опыта ее автора. В своих работах Делп высказывал прогрессивную мысль о сжигании твердого топлива в пылевидном состоянии в крупных камерных топках.

Большим подспорьем для проектирования паровых котлов явился разработанный проф. В. И. Гриневецким графический метод теплового расчета паровых котлов. Автором этого метода были уточнены вопросы теории теплообмена: он намечал пути к правильной оценке теплоотдачи излучением и конвекцией, указывал на зависимость конвективного теплообмена от скорости движения газов,

направления газового потока, его характера, от диаметра и расположения труб конвективных поверхностей нагрева и ряда других факторов. Его метод расчета имел большую практическую ценность, так как был дополнен большим количеством проверенных опытных значений средних коэффициентов теплоотдачи при разнообразных конкретных условиях теплообмена.

Значительный след в развитии теории паровых котлов и топок оставили многочисленные глубокие исследования проф. К. В. Кирша, автора трудов по котлам, топливу, новым методам его сжигания и, в частности, по сжиганию подмосковного угля и антрацита.

В результате большого числа опытов и теоретических работ в нашей стране сложилась прогрессивная школа ученых и инженеров-котельщиков, оказавшаяся способной успешно решить ряд сложнейших проблем, поставленных перед ней позднее в связи с переходом энергетики на новую качественную ступень в эпоху электрификации.

7-3. РАЗВИТИЕ ПАРОВЫХ МАШИН ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XIX в.

Развитие судовых двигателей В развитии паровых машин в рассматриваемый период, так же как и в развитии паровых котлов, значительную роль сыграли судовые паросиловые установки. На флоте влияние каждого процента сбереженного топлива, будучи непосредственно связанным с полезным тоннажем судна и радиусом плавания, оказывалось более значительным, чем в стационарных фабрично-заводских установках.

Необходимость в быстром реверсе машины, от которого могла зависеть безопасность судна и людей, сразу же заставила отказаться от использования маховика в судовых машинах, а отказ от маховика означал, что равномерность вращательного момента машины должна достигаться путем применения многоцилиндровых машин. Поэтому в судовых установках вскоре после их возникновения стали применяться сдвоенные машины, работавшие на общий вал. В 30-х годах XIX в. сдвоенные машины начали заменять компаунд-машинами с последовательным расширением пара в двух цилиндрах с кривошипами, расположенными под углом 90° друг к другу. Двухцилиндровые машины сделали ненужным балансир; передача движения на вал гребных колес устраивалась непосредственно или с применением зубчатой передачи. На рис. 7-12 показана паровая

машина двойного расширения с двумя горизонтальными цилиндрами высокого давления и вертикальным цилиндром низкого давления, построенная в 1829 г. в Германии для парохода «Геркулес».

Машина отличается неодинаковым числом ходов в цилиндрах высокого и низкого давлений; у нее переменный угол заклинивания кривошипов, синхронность периодов рабо-

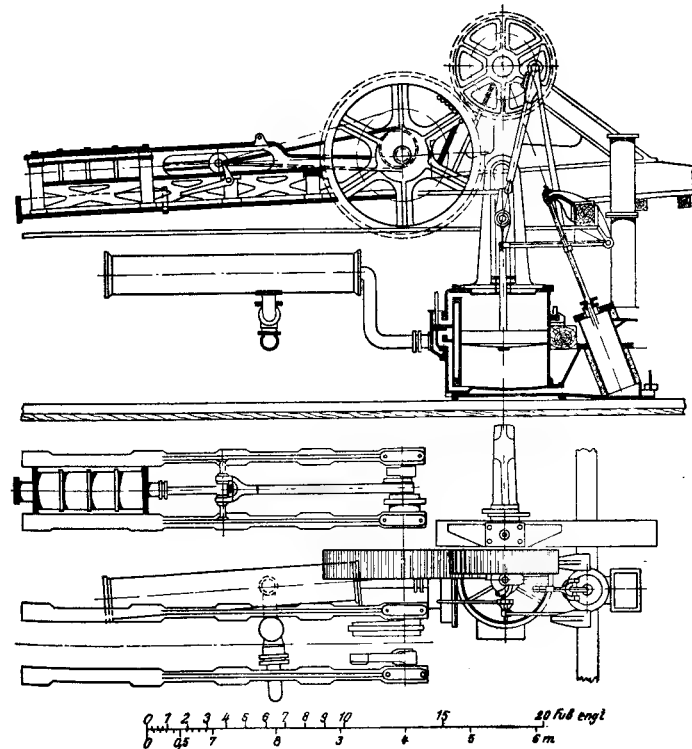


Рис. 7-12. Судовая машина парохода „Геркулес“.

ты ЦВД и ЦНД отсутствует, чем достигнута большая плавность хода, но вызвана необходимость в промежуточном ресивере большой емкости.

Введение гребного винта вместо колес, начавшееся после предложений англичанина Смита, шведа Эриксона и чеха И. Ресселя в 30-х годах XIX в., привело к разработке судовых машин вертикального типа с паровыми цилиндрами, расположенными над коренным валом машины.

Одна из таких судовых машин, построенная в 70-х годах XIX в., представлена на рис. 7-13, где хорошо видны оба цилиндра в разрезе, парораспределительные золотники, эксцентрик, приводящий в движение золотниковую тягу, которая связана с реверсивным механизмом, управляемым от ручного маховика с ручками; показаны вбрызгивающий конденсатор в виде вертикального цилиндра и мокро-воздушный насос, приводимый балансиrom от кривокопфа машины.

Применение для охлаждения пара соленой забортной воды сделало неудобным устройство смесительных конден-

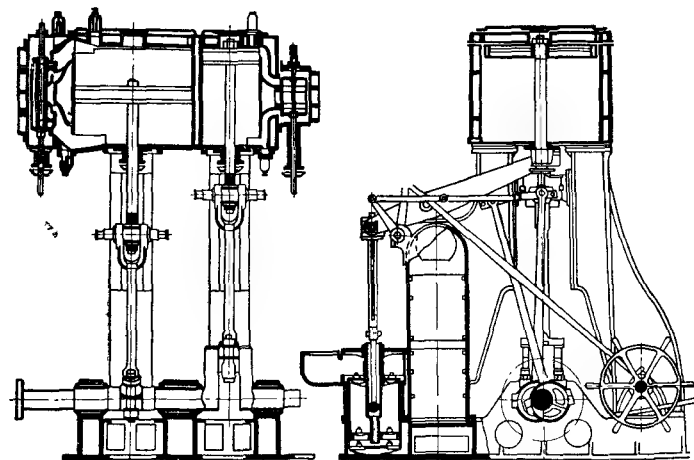


Рис. 7-13. Судовая вертикальная машина компаунд.

саторов из-за невозможности использования конденсата для питания котлов. Вследствие этого для судовых установок прежде всего начали разрабатываться поверхностные конденсаторы, получившие в наше время широкое применение в конденсационных паротурбинных установках.

С 80-х годов XIX в. для судовых паросиловых установок начали строить машины тройного расширения (рис. 7-14) с применением более высоких давлений пара (до 14 ат); эти машины дают наиболее равномерный крутящий момент на коренном валу. С ростом мощности (12 500 л. с. на пароходах «Кампания» и «Лукания», 1892—1893 гг., 14 000 л. с. на пароходе «Император Вильгельм», 1897 г., 17 500 л. с. на пароходе «Дойчланд», 1900 г.) стали разделять у машин тройного расширения от-

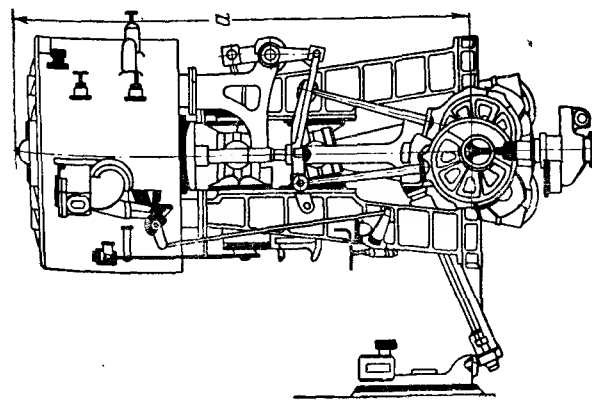
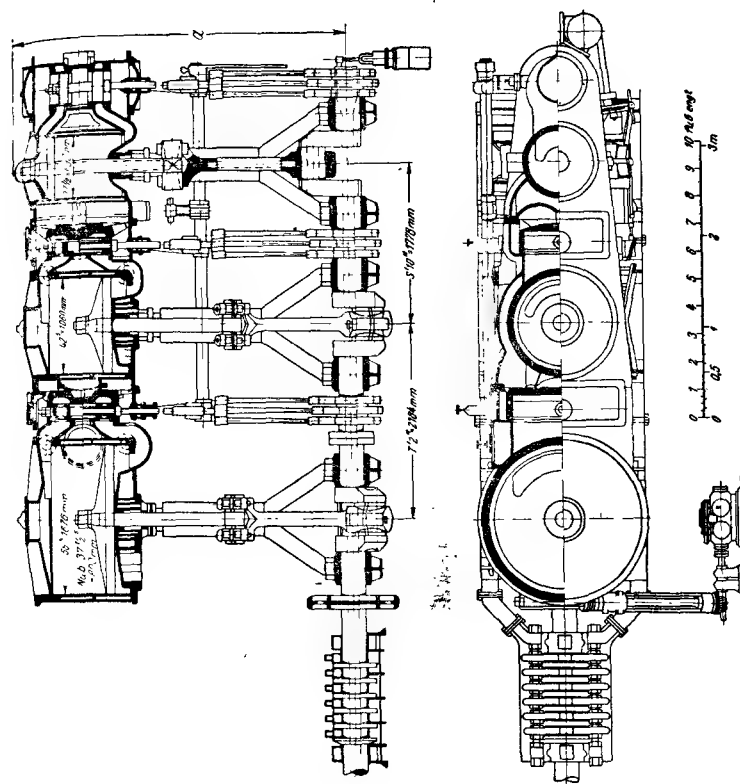


Рис. 7-14. Мощная быстроходная вертикальная судовая паровая машина тройного расширения повышенного (до 14 ат) давления с цилиндрическим золотником у ЦВД и плоскими у ЦСД и ЦНД.

дельные цилиндры (ЦВД или ЦНД) на два, достигая максимума уравнивания громадных движущихся частей машины. Так, машина 17 500 л. с. — последний крупный судовой поршневой двигатель — имела шесть цилиндров: два ЦВД диаметром по 930 мм, расположенные над двумя ЦНД диаметром по 2 700 мм; между ними располагались два ЦСД с диаметрами 1 870 и 2 640 мм. Общий ход поршня был равен 1 850 мм. Четырехколенчатый вал машины имел внешний диаметр 635 мм, диаметр шеек 255 мм и весил больше 100 т.

Применение перегретого пара

Большое значение для повышения экономичности паровых машин имело введение перегретого пара. После своих опытов над перегретым паром в 1857 г. Г. А. Гирн писал: «... в более или менее близком будущем, когда в технической механике здравый дух прогресса восторжествует над рутинной, перегретый пар заменит, несомненно, насыщенный везде, где дело будет идти о получении дешевой энергии». В 1886 г. во 2-м издании своей «Термодинамики» Г. А. Цейнер, во многом расхопившийся с Гирном, вполне соглашался с ним в вопросе применения перегретого пара. Он писал: «...наблюдения и опыты (между которыми высшее место занимают известные прекрасные опыты Гирна) показывают, что паровые машины с перегретым паром будут все более и более применяться в виду тех выгод, которые они представляют в отношении расхода топлива».

Однако внедрение пароперегрева встречало большие трудности. Если относительно невысокий перегрев не представлял особых затруднений при введении пароперегревателей в газоходы паровых котлов, то трудности его использования в цилиндрах паровых машин оказались более значительными. Эти трудности заключались в том, что смазка и уплотнения, хорошо зарекомендовавшие себя при использовании насыщенного пара, не выдерживали перегретого пара. Далее, перегретый пар вызывал коробление плоских золотников, особенно двойных, широко применявшихся в регулируемых машинах, приводил к заклиниванию или пропускам в крановых распределительных механизмах. Нужна была длительная работа по конструированию цилиндрических золотников и клапанных распределительных механизмов, по освоению технологии получения минеральных смазочных масел, способных выдерживать высокую температуру, по конструированию новых типов уплотнений, в частности уплотнений с металлической набивкой, чтобы

постепенно перейти от насыщенного пара к перегретому до 200—250° С. В 1892 г. немецкий инженер В. Шмидт сделал смелое предложение о повышении температуры перегрева сразу на 100° С (до 350° С вместо достигнутого в практике максимального значения 250° С). Для этого

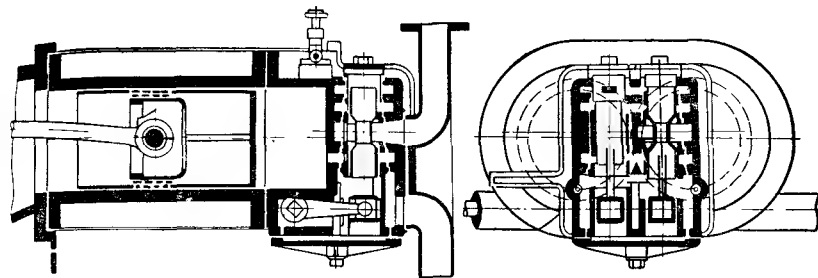


Рис. 7-15. Разрез через паровой цилиндр машины высокого давления. Золотники расположены вертикально в головке цилиндра.

ему пришлось внести ряд конструктивных изменений в его машину (рис. 7-15): использовать цилиндрические золотники, расположенные в зоне высоких температур — головке цилиндра, и совершенно обойти вопрос об уплотнении штока путем применения двухцилиндровой машины простого расширения с непосредственным соединением поршня, имеющего форму стакана, с шейкой кривошипа посредством шатуна.

Прямоточная паровая машина

Последним крупным шагом в развитии паровых поршневых двигателей явилось изобретение «прямоточной» паровой машины (рис. 7-16). Это изобретение было сделано немецким профессором Штумпфом в 1908 г., когда паровая машина должна была бороться за теряемую ею монополию в связи с внедрением паровых турбин и двигателей Дизеля. Как видно из схемы, у этой машины в отличие от обычных пар выпускался из цилиндра через широкое выходное сечение (ряд окон, расположенных по окружности посередине цилиндра и открываемых кромкой бочкообразного поршня). Свободный выход пара позволял прямоточной машине работать с более глубоким (до 0,075 ата) вакуумом, чем у обычных машин (порядка 0,2 ата), что в сочетании с возможностью высокого сжатия значительно сокращало расход пара. Меньшее значение имел принцип прямоточности в силу применения высокого перегрева пара (до 330° С перед впускным клапаном), ма-

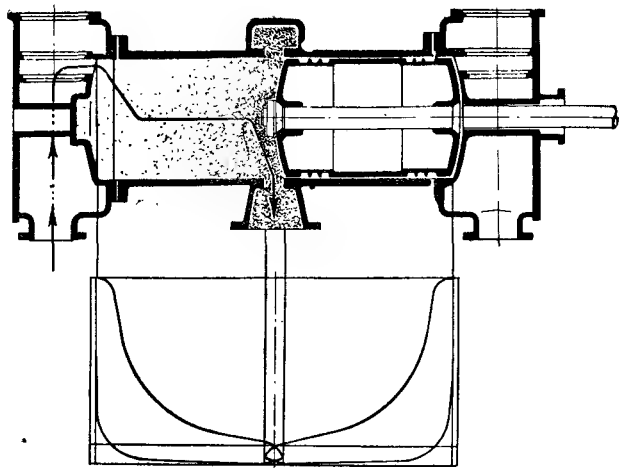


Рис. 7-16. Схематический разрез через цилиндр прямооточной паровой машины.

Стрелкой показан путь пара от золотника (или клапана) к выпускным отверстиям, расположенным в середине цилиндра по его окружности. Внизу в координатах давление — объем показаны индикаторные диаграммы работы пара в полостях цилиндра.

лых вредных пространств и значительного числа оборотов. Расход пара составлял $4,6 \text{ кг/инд. л. с. ч.}$ Прямоточный принцип был использован в ЦНД «полупрямоточных» судовых машин двойного расширения, для того чтобы получить возможность работать на более глубокий вакуум.

Чтобы больше не возвращаться к паровым машинам, утратившим свое место и значение в энергетике, следует, несколько забежав вперед, остановиться на последнем этапе их развития, когда паровые машины начали применяться в качестве двигателя электрогенераторов электрических станций (с 80—90-х годов XIX в. по 10-е годы XX в.).

Генератор электрического тока предъявил к первичному двигателю требования, заключавшиеся в большом числе оборотов, высокой равномерности вращательного движения и непрерывно возрастающей мощности. Последнее требование однозначно решило борьбу в пользу паровой турбины, мощность которой в 20-х годах XX в. достигла 20 000 квт. В агрегатах до 2 000 л. с. использовалась паровая машина, и в указанный период конструкторы паровых машин решали проблемы быстроходности и равномерности.

Решение проблемы быстроходности свелось к применению вертикальных многоцилиндровых машин тройного расширения (см. рис. 7-14). Достигнутые максимальные показатели такого рода машин были таковы: вертикальная машина тройного расширения завода Делоне-Бельвиль мощностью 1 750 л. с. с числом оборотов 250; вертикальная машина тройного расширения (четыре цилиндра) завода Борзиг мощностью 2 200 л. с. с числом оборотов 83,5. При этом следует отметить, что чем больше мощность машины, тем труднее сделать ее быстроходной вследствие увеличения инерции больших движущихся масс.

Возможности горизонтальных машин были еще меньше. Так, четырехцилиндровая горизонтальная машина тройного расширения Аугсбургского завода мощностью 1 900 л. с. развивала только 72 об/мин.

Большая работа была проведена по расчету и конструированию регулирующих систем, подготовившая базу для регулирования более сложных паровых турбин. Центробежные регуляторы, применявшиеся со времен Уатта, получили дальнейшее развитие в связи с предложением схемы регулирования с обратной связью (Фарко, 1873 г.) и теоретической разработкой регуляторов прямого и непрямого действий (И. А. Вышнеградский, 1878 г.). Увеличение мощности машин потребовало увеличения мощности регулятора, а позднее — введения непрямого регулирования. В так называемых «плоских» регуляторах был использован инерционный принцип, получивший широкое распространение в последних моделях быстроходных машин, предназначавшихся для привода электрических генераторов.

Приведенные пределы технических возможностей поршневого парового двигателя — паровой машины, — являвшегося универсальным двигателем промышленности и транспорта в течение всего XIX в., показывают, что эти возможности не соответствовали потребностям, возникшим в конце XIX в.

Новые потребности привели в конечном счете к началу развития нового теплового двигателя — паровой турбины.

7-4. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Первые попытки построения паровых турбин Возникновение и последующее внедрение в производство новой техники всецело определяются острой потребностью в ней, когда существующая техника перестает удовлетворять новые нужды, возникающие в производстве. Потребность в паровой турбине возникла в про-

мышленности в связи с начавшимся применением рабочих машин, обладающих высокой скоростью вращения: дисковых пил, центрифуг, вентиляторов, центробежных насосов, сепараторов, наконец, генераторов электрического тока.

Ряд попыток построения паровых турбин, основанных на реактивном принципе, показанном еще Героном в его «эолипиле», начался в 1791 г. (Садлер) и продолжался до 1837 г. (Жакме). Опыты Сен-Венана и Вантцеля над истечением пара показали, что имелись большие трудности в осуществлении паровой турбины, связанные с высокими скоростями пара. Открытое на основе эксплуатации гидравлических турбин рациональное отношение между скоростями движущей среды и воспринимающей работу лопатки показало, что паровая турбина может эффективно работать только при очень больших числах оборотов.

В опубликованной в 1853 г. работе Делоншана указывалось, что «...пар, как бы ни было мало его давление, имеет чрезвычайно большую скорость при истечении из сосуда, в котором он заключался. Для того чтобы дать хороший к. п. д., скорость на окружности колеса, приводимого в движение паром, не должна быть меньше половины скорости пара, и это обстоятельство мешало до сих пор употреблению реактивных колес. Действительно, водяной пар при 5 атмосферах начального давления вытекает в воздух со скоростью 500 м/сек. Колесо, которое этим паром приводится в движение, должно иметь скорость на окружности около 300 м/сек. Следовательно, если диаметр этого колеса был бы равен 0,95 м, то оно должно было бы делать 6 000 об/мин и ось этого колеса при каком угодно диаметре вращалась бы с такой быстротой, какой не могли бы выдержать никакие подшипники, так как они загорелись бы через короткий промежуток времени».

Таким образом, перед изобретателями паровых турбин намечались два возможных пути: изыскание способов снижения числа оборотов паровых турбин без потери к. п. д. и разработка конструкций, способных работать с большим (несколько тысяч в минуту) числом оборотов.

Первое направление в принципе было намечено Леруа еще в 1840 г. Оно заключалось в применении многоступенчатой турбины. Более отчетливо принцип многоступенчатых турбин в качестве метода снижения числа оборотов был высказан в записке Турнера, рассмотренной в 1853 г. на заседании Парижской академии наук.

«Упругие жидкости, — писал Турнер, — (т. е. газы и

пары) приобретают громадные скорости даже при слабых давлениях. Чтобы надлежащим способом использовать эти скорости на простых колесах, аналогичных водяным турбинам, нужно было бы допустить чрезвычайно большие скорости вращения и сделать очень маленькими площадки для прохода даже большого количества пара. Можно избежать этих трудностей, заставляя газ или пар терять свое давление или постепенно, или сразу отдельными частями и действовать несколько раз на лопатки паровых турбин, размещенные соответствующим образом.

Если разность давлений велика (как это имеет место в паровой машине), то станет ясно, что нужно иметь большое число турбин для достаточного уменьшения скорости рабочей жидкости. Легкость и небольшие размеры движущихся частей позволяют при этом допускать скорости вращения, значительно большие по сравнению со скоростями обыкновенных машин».

На схеме конструкции, предложенной Турнером (рис. 7-17), видна проточная часть (пар идет сверху вниз) с четырьмя рядами сопел (K, G, H, I) и четырьмя рядами рабочих лопаток (B, C, E, F).

Кроме Турнера, многоступенчатый принцип был предложен рядом изобретателей (Жирар, 1855 г., Перриго и Фарко, 1864 г., Эдвардс, 1871 г. и многие другие). Все увеличивавшееся ко-

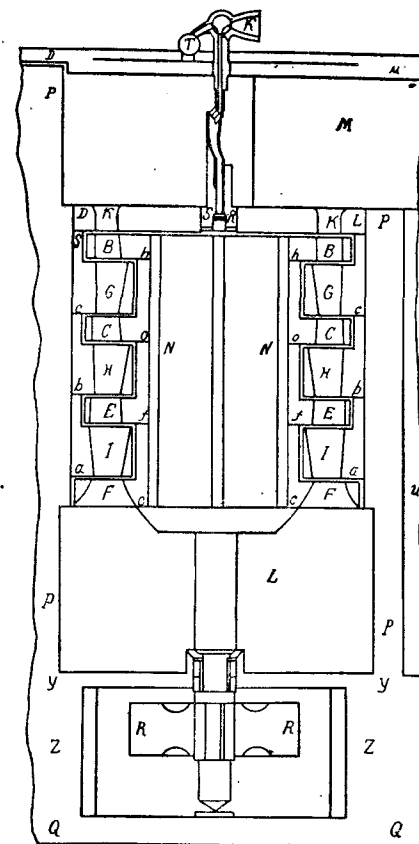


Рис. 7-17. Патентный чертеж многоступенчатой реактивной паровой турбины Турнера.

K, G, H, I — неподвижные сопла; B, C, E, F — подвижные лопатки, сидящие на барабане турбины.

личество различных конструкций паровых турбин, разработанных в течение второй половины XIX в., свидетельствует о возникновении и постепенном обострении противоречия между тихоходной паровой машиной и растущим парком быстроходных рабочих машин. Изобретателям был дан специальный заказ на новый двигатель. Однако достаточную остроту этот заказ приобрел только в 80-х и 90-х годах XIX в. До этого применение паровых турбин носило единичный характер. В 30-х годах XIX в. в г. Сиракузах (США) было построено несколько турбин для привода центробежных пил. Эти турбины представляли собой модификацию «эолипила» Герона, и громадный удельный расход пара в них компенсировался использованием в качестве горючего отходов лесопильного производства. В 50-х годах в Англии для подобных же целей была применена турбина Шиле кустарного изготовления. В 1869 г. У. Горман получил патент на турбину, которая согласно указанию У. Ренкина была применена в Глазго на лесопильне.

Подлинный стимул к развитию паровых турбин возник с началом электроэнергетики, хотя ряд принципиальных вопросов турбостроения был поставлен и в частной форме разрешен еще ранее в трудах шведского инженера Густава Патрика Лавалья, Лаваль был сторонником интенсификации техники, в частности увеличения числа оборотов технических агрегатов; большое число оборотов (6 000—7 000 в минуту) было успешно использовано им в конструкции первого сепаратора непрерывного действия, запатентованного им в 1878 г. Для непосредственного привода своего сепаратора Лаваль в 1883 г. предложил сначала использование простейшей турбины в виде героновского эолипила. Стремясь повысить к. п. д. турбины, Лаваль в 1889 г. изобрел расширяющееся сопло, носящее и поныне его имя и позволяющее понизить давление пара ниже критического, сообщив ему при этом сверхзвуковую скорость. Сопло Лавалья предоставило возможность повышать начальное давление пара, что увеличивает экономичность парового двигателя.

Пойдя по пути освоения высоких скоростей, Лаваль осуществил активную одновенечную турбину, срабатывавшую скоростную энергию пара на одном рабочем колесе, которое вращалось с громадным числом оборотов (порядка 30 000 в минуту). В процессе конструирования такой турбины Лаваль должен был решить ряд сложнейших про-

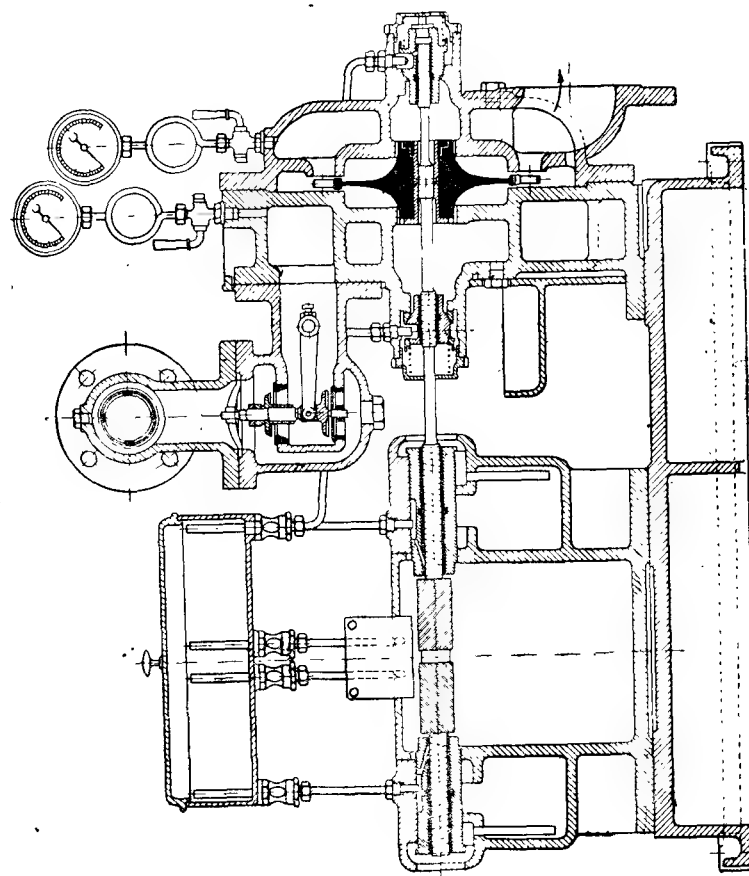


Рис. 7-18. Турбина Лавалья 30 л. с.
Справа виден (показан сплошным черным цветом) диск в форме тела вращения, сопоставления разрыву, сходящий на тонком гибком валу, слева — редуктор, преобразующий турбину по своим разме-рам.

блем (рис. 7-18). Это проблемы: расширяющегося сопла; гибкого вала; турбинного колеса — диска в форме тела равного сопротивления инерционным силам, возникающим при громадном числе оборотов; подшипников гибкого вала, получивших шаровую опору; специальных материалов (им впервые применена была никелевая сталь для лопаток и дисков); автоматического останова турбины при переходе за допускаемую предельную скорость вращения (решенного им в виде «разрушителя вакуума»), наконец проблема редуктора в виде механического зубчатого зацепления пары колес с шевронными геликоидальными зубцами.

Лаваль дал лишь частные ответы на возникшие перед ним проблемы турбостроения: его ответы не имели теоретических обоснований и были применены к частному случаю конструирования турбин небольшой мощности (максимальная мощность турбины Лавалья была 500 кВт). Общие теоретические решения перечисленных проблем изыскивались многими учеными. Теория расширяющегося сопла была дана Г. А. Цейнером (1899 г.), однако получила широкое признание значительно позднее, после опубликования работ ряда ученых, особенно чешского профессора А. Стодола. Теория гибкого вала сложилась в 1894—1895 гг. в результате трудов Фенпла и Дж. Дунверлея; позднее большое количество работ по этому вопросу было систематизировано и самостоительно переработано А. Стодола. В 1879 г. Грюблер установил общую теорию прочности быстро вращающегося диска, после которой разрабатывался ряд методов практического расчета турбинных дисков, значительно развитых и систематизированных тем же А. Стодола, который создал подлинную энциклопедию паровых турбин.

Малая мощность и довольно большой расход пара (6—7 кг/л. с. ч.) в турбинах Лавалья ограничили их применение областью привода маломощных агрегатов с большим числом оборотов. Сейчас мы расцениваем эти турбины как первые машины, в которых были в частной форме решены основные задачи турбостроения и вместе с тем дано направление дальнейшим работам по освоению и совершенствованию принципиально нового типа парового двигателя.

В конце XIX и начале XX вв. далеко не все сумели увидеть в турбине Лавалья росток нового, которому предстоит большое будущее. Так, в 1900 г. уже упоминавшийся ученый котлостроитель проф. Г. Ф. Депп, испытывавший в Петер-

бурге турбину Лавалья, писал, что у этой турбины слишком «... большой расход пара. Поэтому паровые турбины (здесь Депп сделал ошибочное обобщение — Авт.) вытеснить другие паровые машины не могут, а являются необходимыми только в некоторых частных случаях, хотя по местным условиям их действительные, хотя и второстепенные качества являются существенными». В то же время находились инженеры, предвидевшие будущее турбины. К числу их принадлежал А. А. Радциг (впоследствии член-корреспондент АН СССР), основавший кафедру паровых турбин и воспитавший в нашей стране первые кадры теплотехников-турбинистов, впоследствии сыгравших исключительную роль в развитии советского турбостроения.

Паровые турбины для привода электрических генераторов

Быстроходная паровая турбина, не имеющая частей, совершающих возвратно-поступательное движение, заключала в себе замечательное свойство — возможность концентрации громадных мощностей в одном агрегате. Это свойство турбины могло проявиться только при ее объединении с агрегатом, имевшим большие перспективы в связи с увеличением потребляемой мощности, — с генератором электрического тока.

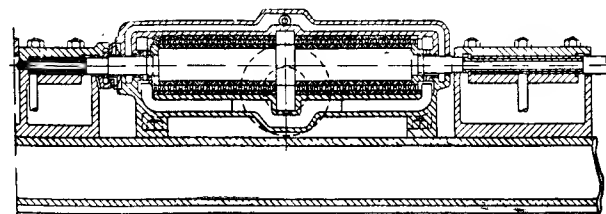


Рис. 7-19. Схематический разрез первой турбины Парсонса.

В этом направлении начал свои работы английский инженер Ч. А. Парсонс. В 1884 г. он получил в Англии патент на многоступенчатую реактивную турбину мощностью около 6 л. с. при 1000 об/мин (рис. 7-19). Для уравнивания осевых усилий пар подводился в кольцевое пространство в средней части турбины, откуда через венцы подвижных и неподвижных лопаток он проходил к концам турбины. Размеры всех лопаток были почти одинаковыми, так что рост сечения для прохода пара практически отсутствовал (он заметен, например, на рис. 7-17 в турбине Турнера).

В течение почти 15 лет, с 1885 по 1899 г., Парсонс строил паровые турбины самых разнообразных конструкций, постепенно вводя новые и новые улучшения, снижая расход пара, достигавший в первых образцах громадной величины около $60 \text{ кг/квт} \cdot \text{ч}$. К 1889 г. турбины Парсонса имели расход пара порядка $12 \text{ кг/квт} \cdot \text{ч}$, и около 300 таких турбин было использовано для привода электрогенераторов. Турбины эти развивали мощность $60\text{—}75 \text{ квт}$ при $4\,800\text{—}5\,000 \text{ об/мин}$. В 1887 г. были впервые применены

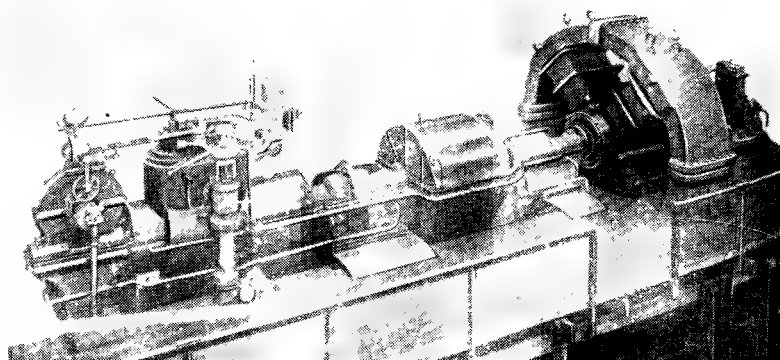


Рис. 7-20. Эльберфельдская установка — паровая турбина.

лабиринтовые уплотнения, использованные для разгрузочного поршня, с введением которого турбины начали строить однопроточными. К 1896 г. в турбине мощностью 400 квт был достигнут расход пара $9,2 \text{ кг/квт} \cdot \text{ч}$. К этому году общая установленная мощность турбин составляла уже $40\,000 \text{ квт}$.

Однако на европейском континенте паровые турбины получили всеобщее признание в качестве двигателя электрогенераторов только с 1899 г. В этом году в немецком городе Эльберфельде на электрической станции для привода генераторов трехфазного переменного тока впервые были применены турбины Парсонса мощностью $1\,000 \text{ квт}$ (рис. 7-20). Заказ на английские турбины при высоком уровне строительства паровых машин в Германии привлек пристальное внимание мировой технической общественности к Эльберфельдской станции, испытание которой было поручено лучшим и авторитетнейшим немецким специали-

стам. Опубликованный ими в 1900 г. обстоятельный отчет установил неоспоримое преимущество паровой турбины перед другими типами двигателей, служивших для привода генераторов электрических станций. Турбины работали паром со средним давлением $10,5 \text{ ата}$, температурой 200°C и показали расход пара $8\text{—}9 \text{ кг/квт} \cdot \text{ч}$ при полной нагрузке агрегата. Дальнейший прогресс турбостроения можно иллюстрировать следующим фактом: в 1913 г. расход пара в турбине Парсонса мощностью $25\,000 \text{ квт}$, рабо-

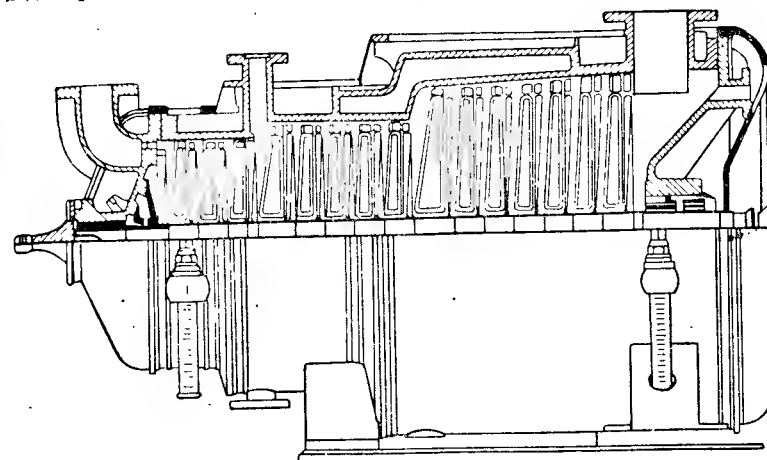


Рис. 7-21. Многоступенчатая паровая турбина с активными ступенями давления конструкции О. Рато.

тавшей паром 14 ати при температуре 304°C , составил $5 \text{ кг/квт} \cdot \text{ч}$. Значительное место в снижении удельных расходов пара имело примененное впервые в турбинах завода Парсонса углубление вакуума посредством «струйных элементов», явившихся предшественниками современных пароструйных эжекторов.

Паровые турбины начинают развиваться во всех передовых в техническом отношении странах.

В 1900 г. на Всемирной выставке в Париже французским профессором Огюстом Рато были представлены чертежи и детали паровой турбины мощностью $1\,000 \text{ л. с.}$, сконструированной на принципе разбивки общего перепада давлений на отдельные активные ступени, в каждой из которых срабатывался лишь незначительный перепад давлений. Многоступенчатая турбина Рато (рис. 7-21) была ее автором подвергнута технической инверсии и превращена

в осевые турбокомпрессоры и воздуходувки. Эти машины в свою очередь положили начало новой области применения паровых турбин, которые использовались теперь для привода компрессоров и воздуходувок.

В 1903 г. инженер завода Эшер-Висс в Швейцарии Генрих Целли коренным образом усовершенствовал турбину Рато, уменьшив число активных ступеней давления с 16—20 до 7—10, что в значительной степени упрощало и удешевляло турбину.

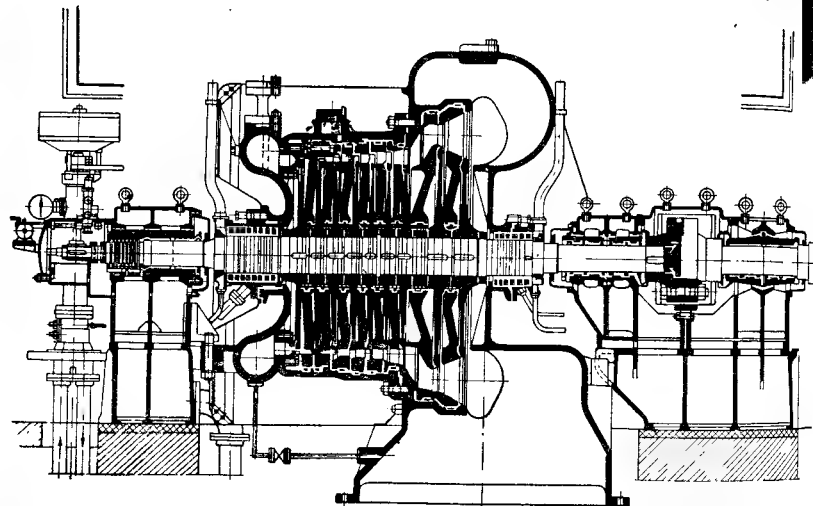


Рис. 7-22. Активная турбина со ступенями давления по патенту Целли на 8 000 л. с. Герлицкого машиностроительного завода.

шевляло турбину. Немедленно образовался синдикат из ряда крупных машиностроительных заводов для постройки турбин по патенту Целли (рис. 7-22).

Разбивку скоростного перепада на ряд ступеней скорости ввел в 1896 г. американский инженер Чарльз Кертис. По его предложению пар, покидающий сопло с большой скоростью, отдает активному венцу не всю, а только половину своей скоростной энергии, для чего лопатки венца движутся не с половинной, а с четвертной скоростью по сравнению со скоростью струи пара; вышедший из первого венца и отдавший ему половину своей скорости пар поворачивается без изменения его параметров на неподвижных лопатках направляющего аппарата и затем поступает на лопатки второго рабочего венца, которому он отдает всю свою скорость, так как второй венец движется в 2 раза

медленнее струи пара. Таким образом, абсолютная скорость первого венца оказывается равной абсолютной скорости второго венца, а поэтому они могут быть объединены на одном колесе-диске, получившем название диска Кертиса (рис. 7-23 заимствован из патентной заявки Кертиса).

Первые годы XX в. знаменуются началом турбостроения в ряде стран: Германии, Франции, США, Швейцарии, Шве-

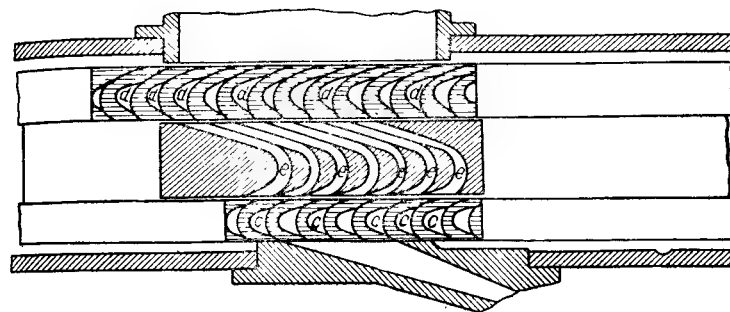


Рис. 7-23. Чертеж турбины со ступенями скорости по патенту Кертиса.

с—рабочие лопатки первой ступени; е—неподвижные направляющие лопатки; д—рабочие лопатки второй ступени.

ции, Австро-Венгрии (на заводах Шкода в г. Брно, Чехословакия).

В дореволюционной России паровые турбины выпускались только Петербургским металлическим заводом (ныне ЛМЗ). До 1917 г. завод выпустил всего 26 паровых турбин суммарной мощностью 9 000 квт с наибольшей мощностью отдельной турбины 1 250 квт. С началом внедрения паровых турбин на судах военно-морского флота в России был специально оборудован на Балтийском заводе в Петербурге турбинный цех, стоявший на одном уровне с турбинными цехами крупнейших зарубежных заводов и обеспечивавший турбинами строившиеся в России суда.

Морской флот определил еще одну широкую область применения паровых турбин, в которой паровая машина истощала свои возможности установкой мощностью 35 000 л. с. (2×17 500 л. с., 1900 г.). Первое опытное судно «Турбиния» с турбинами радиального типа, развивавшими 8 000 об/мин, было сооружено Ч. Парсонсом в 1894 г. Явление кавитации при работе винта с 8 000 об/мин, вызвало перестройку «Тур-

бинии»; оборудованная осевыми турбинами с 2 200 об/мин, «Турбиния» показала рекордную скорость 32 узла (около 60 км/ч). С 1900 г. паровые турбины начали применяться на миноносцах. Правда, первые два турбинных миноносца — английские «Кобра» и «Випера» — погибли в 1901 г. от не установленных причин. Но это не помешало английскому адмиралтейству заказывать новые турбинные миноносцы («Велюкс», 1902 г., «Эмден», 1903 г. и др.). В 1911 г. паровые турбины были впервые установлены на пассажирском пароходе «Король Эдуард» водоизмещением 650 т, с чего начался быстрый прогресс судового турбостроения. В 1905—1906 гг. был построен первый крупный броненосец — дредноут, после которого линейные корабли строились только с паровыми турбинами. В 1906 г. были спущены на воду «Лузитания» (погибшая во время войны 1914—1918 гг. от торпеды, пущенной немецкой подводной лодкой) и «Мавритания» (пошедшая в результате мирового кризиса 1929—1932 гг. на слом). Эти пассажирские суда — «лайнеры» — имели водоизмещение по 41 000 т и мощность турбинных установок 70 000 л. с., вдвое превосходящую максимальную мощность судовой паросиловой установки при посредстве поршневых машин. К этому же периоду относится сооружение первой крупной комбинированной установки с поршневым двигателем в части высокого давления и паровыми турбинами в части низкого давления. Такой установкой был оборудован «Титаник», погибший в 1911 г. во время своего первого рейса от столкновения с айсбергом.

Судовые установки с большой разницей в оптимальном числе оборотов турбины (1 500—3 000 об/мин) и гребных винтов (100—200 об/мин) поставили проблему редуцирования, решенную тремя различными методами: механическая передача, гидравлическая передача и электрическая передача (турбоэлектроходы).

7-5. РАЗВИТИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Двигатели низкого сжатия Во второй половине XIX в. происходила постепенная специализация двигателей внутреннего сгорания, в первую очередь по виду применяемого в них горючего.

Газовые двигатели, возникшие в самом начале рассматриваемого периода (см. гл. 3), получили значительное развитие, в особенности в тех случаях, когда они выгодно сочетались с технологическими условиями их использования. В этом направлении особое значение получило использова-

ние газов доменных печей. В 1900 г. завод Коккериль (Бельгия) демонстрировал на Парижской выставке газовый двигатель на доменном газе мощностью 600 л. с., а к 1906 г. единичная мощность таких двигателей превысила 2 000 л. с. Они находили применение для привода доменных воздуховодов, прокатных станов и электрогенераторов.

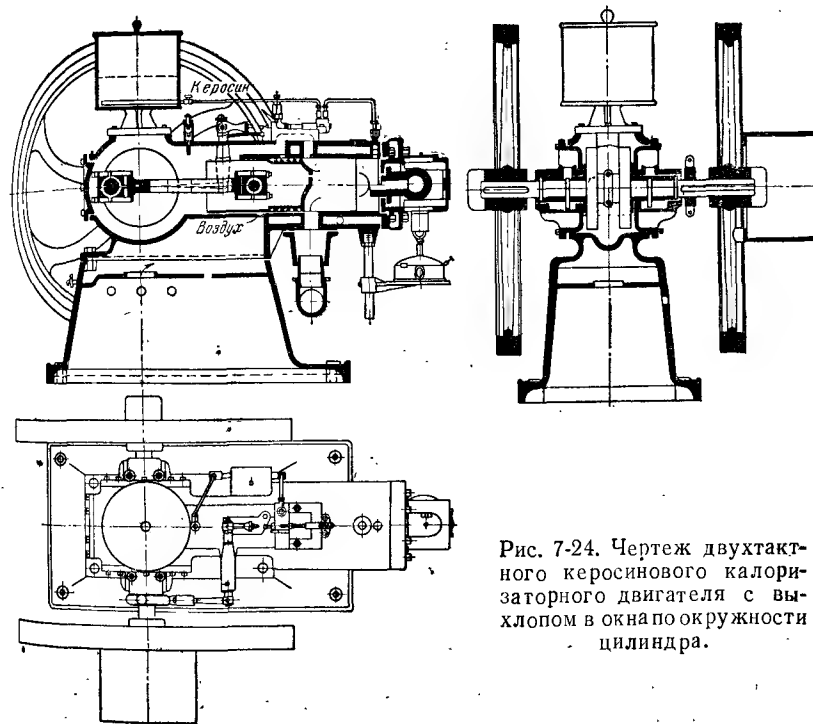


Рис. 7-24. Чертеж двухтактного керосинового калоризаторного двигателя с выхлопом в окно по окружности цилиндра.

ров станций крупных металлургических заводов; к 1906 г. мощность таких двигателей в одной только Германии превысила 375 000 л. с.

Освоение жидкого топлива в двигателях внутреннего сгорания осуществлялось по двум отдельным путям: по одному пути шло развитие двигателей, использующих керосин, по другому — легкие погонны нефти, преимущественно бензин. Керосиновые двигатели конструктивно выполнялись в виде калоризаторных двигателей (рис. 7-24) с зажиганием взбрызгиваемого в полость цилиндра керосина от полого чугунного шара — калоризатора. Этот шар разогревался от керосиновой горелки перед пуском двигателя,

а в процессе работы двигателя он нагревался за счет всплеск в полости цилиндра. Двигатели такого типа, достаточно простые в производстве и эксплуатации, надежные и недорогие, получили широкое распространение в качестве мелких двигателей небольших мастерских, в сельском хозяйстве и (в вертикальном исполнении) на множестве небольших, преимущественно рыболовецких судов.

Один из первых наиболее удачных бензиновых двигателей был запатентован в Германии Г. Даймлером в 1885 г. для применения в автомобиле. Таким образом, сразу же определилась основная сфера использования бензинового двигателя, получившая свое колоссальное развитие уже в XX в., когда этот двигатель стал применяться в авиации.

Особую линию развития двигателей внутреннего сгорания начал немецкий инженер Рудольф Дизель, получивший немецкий патент в 1892 г. на двигатель нового типа, основы которого были изложены им в небольшой брошюре «Теория и конструкция рационального теплового двигателя»; вышедшей в 1893 г.

Предложение Дизеля сводилось к осуществлению в полости двигателя высокого сжатия воздуха с целью повышения его температуры выше температуры воспламенения горючего. Будучи подано в полость двигателя в конце хода сжатия, горючее воспламенится от нагретого воздуха и, нагнетаемое постепенно, осуществит процесс подвода тепла без изменения температуры в соответствии с циклом Карно (см. гл. 3). Дизель сознательно упростил цикл Карно в части процесса сжатия, ограничившись одним адиабатическим сжатием, но расчет вел на изотермическое горение в соответствии с циклом Карно. Произведя тепловой расчет своего двигателя мощностью 100 л. с., он получил температуру в конце сжатия 1073°K , давление 250 атa и к. п. д., равный 0,73.

Предлагая свой рациональный двигатель, Дизель предполагал, что широкое распространение его «будет противодействовать развитию централей», что мелкая промышленность будет размещаться вне больших городов, а не будет «...централизованной в городах без света, без воздуха и без достаточного пространства...», и, таким образом, разделял ненаучные взгляды на возможность прекращения капиталистической концентрации производства (см. гл. 3).

Работа Дизеля получила широкий отклик среди ученых-теплотехников. Правда, Келер, крупный немецкий

специалист по газовым двигателям, предупреждал Дизеля, что один термический к. п. д. еще не определяет экономической эффективности двигателя, а при высокой степени сжатия, предложенной Дизелем, и соответственно большой затрате механической работы на осуществление процесса этого сжатия механический к. п. д. двигателя, а следовательно, и экономический его коэффициент могут оказаться весьма невысокими. Но наряду с отрицательными отзывами имелся ряд положительных отзывов, принадлежавших весьма авторитетным ученым, среди которых были К. Линде, Г. А. Цейнер и М. Шредер.

Линде являлся крупнейшим авторитетом по холодильным установкам, изобретателем и конструктором первых холодильных машин, послуживших исходной базой для возникновения хладотехники как широкой отрасли промышленности.

Цейнер — крупнейший в Германии и общепризнанный специалист по паровым машинам. Шредер — немецкий ученый-теплотехник, автор теоретических работ по паровым машинам в термодинамике, участник работ комиссии по испытанию паротурбинной установки на Эльберфельдской электростанции в 1899 г.

Положительные отзывы о работе Дизеля дали ему возможность заинтересовать своим изобретением два крупных капиталистических предприятия: известную всему миру «фабрику смерти» Круппа и Общество аугсбургских машиностроительных заводов. В I квартале 1893 г. были подписаны договоры, по которым фирма Круппа брала на себя финансирование опытов по новому двигателю; Аугсбургский завод предоставлял помещение и оборудование в одном из своих цехов.

Первый двигатель, отличавшийся рядом необычных особенностей, был готов летом 1893 г. Он должен был работать на угольной пыли, вводимой в полость двигателя насосом в конце хода сжатия, когда давление в полости достигало 90 атa, а температура 800°C . Охлаждение двигателя отсутствовало, так как предполагалось, что горение по изотерме не вызовет большого повышения температуры, а эффективность цикла будет настолько велика, что не превращенное в работу тепло будет успешно эвакуироваться из полости двигателя с выхлопными газами. Двигатель был запущен от трансмиссии и взорвался, чуть не поглотив изобретателя. В этом же месяце (что говорит об интересе к новому двигателю и прекрасных условиях, в которые был поставлен Р. Дизель) был готов второй двигатель, в котором Дизель на основании неудач первого опыта отказался от угольной пыли, и ввел водяное охлаж-

дение; в этом двигателе удавалось получить не более одной вспышки при впрыскивании бензина. В августе испытанию подвергся третий опытный двигатель, который был в состоянии делать несколько оборотов на холостом ходу, что позволило получить индикаторные диаграммы, сразу же показавшие справедливость сомнений Келера. При сгорании, близком к изотерме, как это предусматривается циклом Карно, площадь индикаторной диаграммы и соответствующая ей работа (рис. 7-25) были настолько малы, что целиком расходовались на преодоление вредных сопротивлений холостого хода.

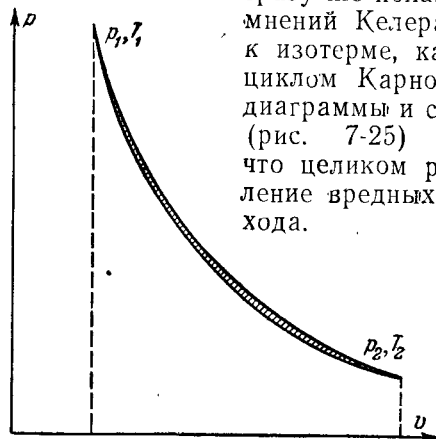


Рис. 7-25. Цикл Карно в $p-v$ -координатах при условии реально возможных значений температурного перепада (примерно $1\,200 - 300^\circ\text{C}$).

ра кривой процесса сгорания...», как это было показано на приложенном к патенту чертеже (рис. 7-26). Из чертежей видно, что стремление увеличить работу цикла привело

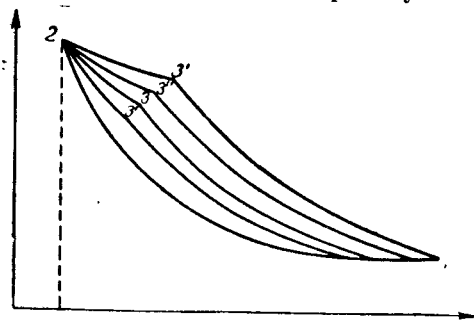


Рис. 7-26. Патентный чертеж Дизеля с увеличением площади цикла, приводящим к превращению процесса 2—3 в изобарический (при постоянном давлении).

Дизель с исключительным остроумием вышел из казавшегося безвыходного положения. В ноябре 1893 г. он получил новый патент (являющийся дополнением к основному патенту), который предусматривал метод регулирования мощности двигателя «...путем видоизменения характер

к отходу от изотермы и постепенному приближению к изобаре (горизонтальной линии постоянного давления). При этом, несмотря на снижение давления в конце сжатия с 90 до $35-40\text{ атa}$, в связи с чем температура в конце сжатия достигала величины 600°C вместо 900°C , температура в конце сгорания повышалась до $1\,500^\circ\text{C}$. Это потребовало интенсивного охлаждения стенок цилиндра.

Упорное конструирование нового двигателя было продолжено. Двигатель 1894 г. мог работать только на холостой ход. Двигатель 1895 г. с распыливанием керосина от компрессора и хорошим водяным охлаждением был первым опытным двигателем, способным работать с небольшой нагрузкой. Только в 1896 г. испытание нового опытного образца принесло успех. Но в этом образце двигателя (рис. 7-27) был сделан ряд отступлений от принципов, изложенных в брошюре Дизеля в 1893 г.: вместо угольной пыли — керосин, вместо изотермы — изобара, вместо насоса — компрессор, сжатие вместо 90 атa — 35 атa , вместо полного отсутствия охлаждения — интенсивное водяное охлаждение. Испытание опытного экземпляра 1896 г. было проведено в начале 1897 г. М. Шредером и показало, что в части к. п. д. Дизель не достиг своих предположений: индикаторный к. п. д.

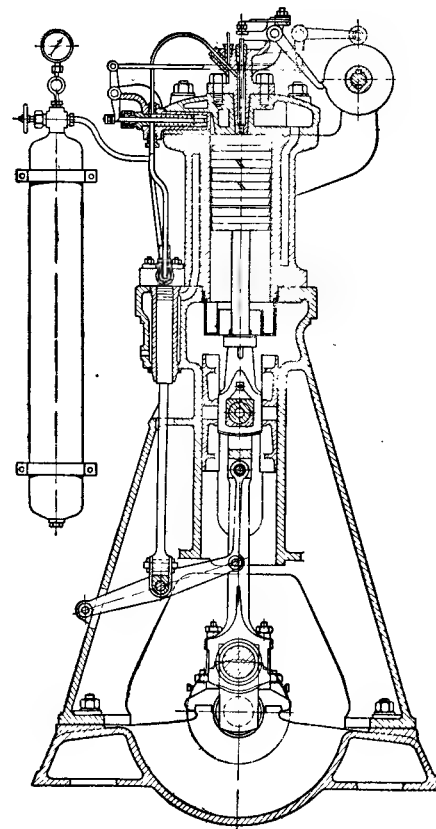


Рис. 7-27. Опытный двигатель Дизеля 1896 г.

Слева — компрессор, приводимый в действие от шатуна двигателя через балансиры и пусковой баллон сжатого воздуха, вдувавшего керосин в рабочую полость цилиндра через игольчатый клапан, расположенный на геометрической оси цилиндра; в левой части крышки цилиндра расположен клапан для всасывания воздуха и выхлопа продуктов сгорания, приводимый в действие от кулачка, расположенного справа от двигателя на кронштейне.

оказался равным 33,4%, что при сравнительно низком механическом к. п. д. (75,0%) давало экономический к. п. д. 25,0%.

В то время к. п. д. лучших газовых двигателей достигали значения 24,0%, но они были связаны с источником газа (газогенератор, домна) и не могли работать на транспортных установках. Калоризаторные же двигатели низкого сжатия имели к. п. д., не превышавший 16,0%.

Двигатели, построенные по патенту Дизеля на ряде заводов, оказались неудовлетворительными, и потребовалась систематическая и упорная их «доводка». Ведущая роль в этой работе принадлежала Аугсбургскому заводу. Здесь полезно сослаться на указание автора «Истории теплотехники» А. А. Радцига, который очень хорошо подметил характерное изменение условий развития техники в начальный и последующие периоды капиталистической эпохи. Т. Севери, Д. Папен, Т. Ньюкомен являлись людьми, в полной мере реализовавшими свои изобретения. Реализация машины Дж. Уатте уже была бы неосуществима без участия капиталиста и заводчика М. Болтона. Дж. Стефенсон, как позднее и Ч. Парсонс, сами являлись владельцами заводов, на которых они реализовали свои изобретения при помощи большой группы квалифицированных инженеров. В реализации изобретения Р. Дизеля уже произошло характерное для нашего времени разделение функций изобретателя и исполнителя. Последний представляет собой, как правило, большой и высококвалифицированный коллектив, способный развить и реализовать идею изобретения, так как сам изобретатель не имеет возможности это сделать.

После демонстрации на Парижской выставке 1900 г. двигателя Дизеля, усовершенствованного Аугсбургским заводом и получившего впоследствии название «дизель», ряд заводов начали дизелестроение. Вначале дизели получили распространение для силовых установок небольших заводов и фабрик, но тенденция капиталистической концентрации стала предъявлять требования к повышению их мощности. Завод Зульцера, сконструировав двухтактный двигатель в первом десятилетии XX в., довел его мощность до 2400 эфп. л. с. (рис. 7-28). Кроме Германии, дизели стали строить в Англии, Дании, Австро-Венгрии.

Сам Дизель был вынужден до конца своей жизни (1913 г.) защищать свои патентные права в ряде стран, так как горение при постоянном давлении (правда, без вы-

сокого сжатия), к которому он постепенно пришел, было запатентовано рядом изобретателей в разных странах.

Следует отметить, что в отношении внедрения двигателей Дизеля в России сложились очень благоприятные условия, не замедлившие сказаться в ряде отечественных

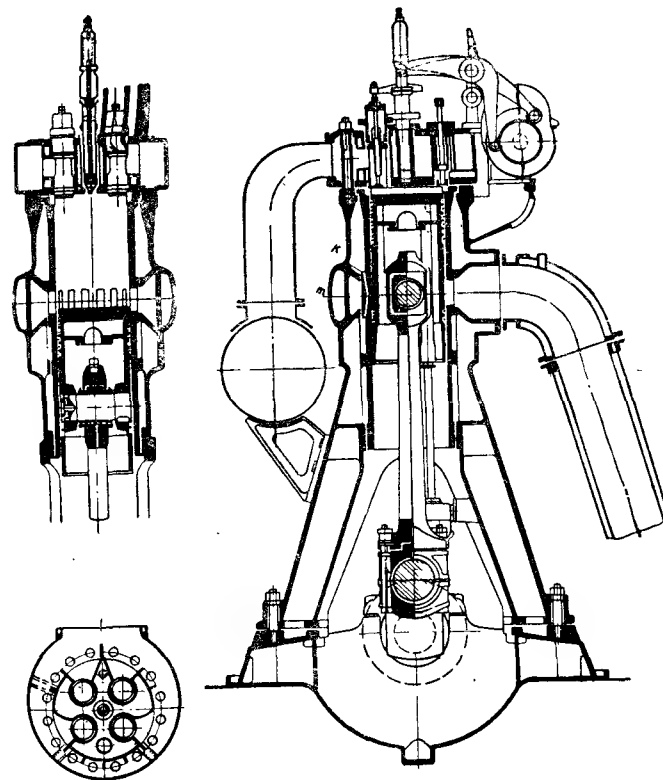


Рис. 7-28. Двухтактный двигатель Дизеля завода Зульцер мощностью 2400 л. с.

Слева виден резервуар продувочного воздуха, справа — наклонная выхлопная труба, соединенная с окнами, расположенными по окружности цилиндра. В головке двигателя: слева — продувочный клапан, справа — форсунка, подающая в полость цилиндра горючее.

достижений в дизелестроении. Эти благоприятные условия заключались в том, что: а) в России, отстававшей в процессе капиталистического развития от многих других стран, были достаточно широко распространены мелкие и средние промышленные предприятия, имевшие 10—100 рабочих, для которых дизель был удобным и экономичным.

мичным двигателем; б) Россия богата ресурсами жидкого горючего, уже широко эксплуатировавшимся в конце XIX в.; в) в области дизелестроения не могла сильно сказаться конкуренция западноевропейских стран, начинавших эту область производства одновременно с Россией; г) в России не было крупных предприятий по выпуску паровых машин, которые из соображений конкуренции могли бы оказывать противодействие развитию дизелестроения.

Перечисленные общие условия отчетливо проявились в конкретной форме, оказавшей стимулирующее действие на изобретателей и конструкторов. Крупнейший нефтепромышленник в России Э. Нобель заплатил за право использования патента и чертежей двигателя Дизеля громадную сумму с тем, чтобы увеличить сбыт нефти и, в связи с этим специализировал свой завод по производству дизелей. Таким образом, ряд технических работников получил непосредственное задание работать в области конструирования двигателя Дизеля и, в частности, решить задачу перехода этого двигателя с керосина на сырую нефть. Эта задача была успешно решена в 1899 г. Нефтяной двигатель был испытан проф. Г. Ф. Деппом и показал расход нефти 240 г на 1 л. с. ч., тогда как нефтяные двигатели с калоризатором потребляли не менее 400 г. Вскоре была осуществлена первая бескрейцкопфная конструкция двигателя с непосредственным соединением поршня двигателя с шейкой кривошипа коренного вала. Эта конструкция уменьшала высоту двигателя, его вес, металлоемкость и вскоре была принята повсеместно.

Особенно много было сделано в России в области конструирования судовых дизелей. Первым дизельным судном в мире явился нефтевоз «Вандал», построенный в 1903 г. Так как двигатель не имел устройства для реверса, установка предусматривала электрическую передачу энергии на гребной вал судна для получения заднего хода; передний ход достигался непосредственным соединением вала двигателя с валом винта. В 1904 г. был спущен на воду второй, улучшенный экземпляр судна под названием «Сармат» с двумя двигателями по 180 л. с., развивавшими 240 об/мин.

Стремление избежать сложной электропередачи побудило конструкторов искать способ непосредственного реверсирования двигателя, который был найден и успешно применен к двигателю подводной лодки «Минога» в 1908 г. Опыты проф. Н. А. Быкова над этим двигателем показали, что

он легко реверсировался за 10—12 сек и, кроме того, расходовал только 200 г нефти на 1 л. с. ч.

В 1907 г. на Волге было спущено первое буксирное судно с двигателями Дизеля — «Мысль», впервые получившее быстро привившееся в технической терминологии наименование «теплоход». В 1910 г. дизельными двигателями (2×500 л. с.) были оборудованы первые военные суда — канонерские лодки «Карс» и «Ардаган», а для Амурской речной военной флотилии — серия мощных речных мониторов с восьмицилиндровыми двигателями суммарной мощностью 1320 эфп. л. с. и электроприводом на гребные винты. С 1911 г. постройкой первого комфортабельного речного пассажирского теплохода «Бородино» был начат регулярный выпуск судов этого типа, в которых была отлично решена задача уравнивания инерционных усилий в механизмах двигателей.

Работа над двигателями повысила многие их технические показатели; в частности, сильно снизилась металлоемкость двигателей: вес на 1 л. с. развиваемой мощности был снижен с 224 до 20—25 кг.

Кроме завода Нобеля (впоследствии завод «Русский дизель»), построившего в 1910 г. двигателей на суммарную мощность 11840 л. с., приступили к выпуску дизелей другие заводы страны, среди них такие, как Коломенский, Сормовский, Николаевский и др.

Многое для разработки конструкций судовых двигателей было сделано на Сормовском заводе. Здесь, в частности, проводились первые опыты по разработке конструкции бескомпрессорного дизеля, предпринятые с 1898 г. Г. В. Тринклером, который ввел так называемую «открытую» форсунку. Эта форсунка была использована Литценмейером при разработке его системы двигателя, выпускавшегося Сормовским заводом под названием «Литценмейер — Сормово». Об этих двигателях Г. В. Тринклер сообщал, что «...Литценмейер создал «средне арифметическое» между моим двигателем и дизельским. Он взял то, что было хорошего у каждого из нас: от меня — открытую форсунку и введение топлива в форсунку при всасывающем ходе поршня, от Дизеля — компрессор».

Нельзя не отметить и работы Коломенского завода. Именно здесь были построены упоминавшиеся теплоходы «Мысль», «Бородино» и многие другие. Именно здесь проф. В. П. Аршаулов разработал систему уравнивания для спроектированной им двухвальной установки теплохода «Бородино», состоявшей из двух шестицилиндровых двигателей по 750 эфп. л. с., которые при 240 об/мин позволяли судну развивать скорость 25,5 км/ч. Коломенским заводом в 1908 г. был построен первый морской теплоход — танкер «Дело» с двумя двигателями по 500 эфп. л. с. и передач на винты по системе инж. Р. А. Корейво. Этим же выдающимся инженером был разработан и испытан в готовой конструкции, выполненной на Коломенском заводе, первый опытный двухтактный двигатель со встречным движением двух поршней. По предложению инж. Д. Д. Филиппова был построен быстроходный четырехтактный двигатель двойного действия мощностью 550 л. с., отли-

чавшийся высокой быстроходностью (250 об/мин). Этот двигатель являлся прототипом последующих двигателей для крупных судов, работающих на гребные винты через электрические передачи.

Николаевский судостроительный завод выпускал двигатели периодически, однако он достиг значительных успехов в освоении мощных машин, например двухтактных шестичилиндровых двигателей по 1 150 эф. л. с. для морского танкера.

Рижский завод Фельзера, строивший дизели с 1906 г., был в 1915 г. эвакуирован в Нижний Новгород, где он послужил базой для развития современного завода «Двигатель революции».

Харьковский паровозостроительный завод с 1914 г. начал самостоятельное проектирование двигателей, разработав стационарные установки по 800 л. с. при 170 об/мин и быстроходные восьмицилиндровые двигатели для подводных лодок мощностью по 1 320 л. с.

Двигатели типа «Литценмейер — Сормово» строились также в Киеве на заводе Гретер Криванек и в Москве на заводе бр. Бромлей; двигатели эти получили широкое распространение на мелких предприятиях. После революции завод Бромлей был реорганизован и развивался в первоклассный станкостроительный завод «Красный пролетарий».

Значительное распространение в России имели двигатели Ижорского завода, двигатели «Русь» Ревельского (ныне Таллин) завода, двигатели «Урсус» Варшавского завода и двигатели некоторых мелких заводов.

Легкие нефтяные бескомпрессорные двигатели транспортного назначения разрабатывались на заводе Я. В. Мамина в г. Балакове на Волге. Я. В. Мамин, ученик изобретателя гусеничного трактора (1888 г.) Ф. А. Блиннова явился в России пионером производства тракторных дизелей.

Совершенствование двигателя внутреннего сгорания, разработка двигателей специальных назначений, удовлетворявших ряду новых требований, создали широкую техническую базу для развития двух новых отраслей крупной промышленности: автомобилестроения и самолетостроения. Их возникновение, вызвавшее колоссальный рост потребностей в легком топливе — бензине и увеличении потребности в сырой нефти как топливе военно-морских флотов, создали новое обострение противоречий между империалистическими странами, включив в сферу их экспансии ряд стран, обладающих богатыми месторождениями нефти.

В России отсталый русский капитализм, несмотря на наличие в стране огромных ресурсов нефти, не смог основать автостроение и самолетостроение; эти отрасли промышленности были созданы и выросли в советское время.

7-6. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Социальный заказ на рассмотренные ранее типы тепловых двигателей исходил из непосредственных нужд производства: паровую машину вызвал к жизни кризис гидро-

энергетики, двигатель внутреннего сгорания — кризис ремесленного производства, паровую турбину — интенсификация производственных процессов, породившая быстроходные технологические машины. Последний по времени возникновения тип тепловых двигателей — газовая турбина — привлек к себе внимание ученых и инженеров задолго до того, как проявилась непосредственная потребность в двигателе такого типа. Это обстоятельство объясняется развитием теоретических основ теплотехники и прикладной механики, подсказывавших специалистам возможности получения высокого эффекта от газовой турбины. Из небольшой таблицы отчетливо видно, что газовая турбина освобождается от необходимости иметь паровой котел и, используя кинетическую энергию, от неудобств возвратно-

Способ использования энергии	Потенциальная энергия, поршень	Кинетическая энергия, лопатка
Рабочее тело		
Пар	Паровая машина, XVIII в.	Паровая турбина, конец XIX в.
Газ	Двигатель внутреннего сгорания, середина XIX в.	Газовая турбина, середина XX в.

поступательного движения. Почему же, несмотря на эти преимущества, она явилась последним по времени возникновения тепловым двигателем? Причина состояла в трудностях практического изготовления газовой турбины. Путь от паровой машины (XVIII в.) к двигателю внутреннего сгорания (середина XIX в.), к паровой турбине (конец XIX в.) и, наконец, к газовой турбине (середина XX в.) представлял собой путь от грубого чугунного литья и уплотнений поршня в виде пропитанной салом ченьковой веревки к станочной обработке и поршневым кольцам, к освоению громадных чисел оборотов и гидродинамической смазки, и, наконец, к небывалым во всей истории теплового двигателя требованиям к материалу и технологии, которые предъявила газовая турбина. Отсюда — долгий путь освоения газовой турбины. Т. Севери соорудил свой насос и поставил его в рудник для практической работы по откачиванию воды. Работоспособной оказалась и первая машина Ж. Э. Ленуара, начавшая историю двигателей

внутреннего сгорания. Больше труда потребовала в освоении маленькая турбинка Г. П. Лаваля, несмотря на остроумные и оригинальные решения ее автора. Ряд заводов осваивал двигатель Р. Дизеля; Ч. Парсонс с группой своих инженеров и мастеров полтора десятилетия упорно работал над паровой турбиной, прежде чем ее признали лучшим двигателем электростанций. И, наконец, задолго до возникновения непосредственной потребности в газовой турбине многие ученые и инженеры мира трудились над созданием условий для ее построения.

Подобно тому как термодинамический цикл паровой турбины отличается от цикла поршневой паровой машины в основном только величиной абсолютного давления конца расширения (0,1—0,2 *ата* у поршневых машин и 0,04—0,05 *ата* у паровых турбин), и цикл газовой турбины отличается от цикла двигателя внутреннего сгорания возможностью вести расширение газа до атмосферного давления (1,0 *ата*), тогда как поршневые д. в. с. производят выхлоп при давлении, значительно превышающем атмосферное (до 2,5 *ата*).

Цикл с более глубоким расширением эффективнее, но его осуществление в газовой турбине встречает ряд значительных трудностей. Прежде всего трудно организовать на лопатках турбины столь же эффективное протекание процесса расширения, как в поршневом двигателе, вследствие утечек через зазоры, ударов и вентиляционных потерь. Далее, сжатие, осуществляемое компрессором, требует высокого к. п. д. этого агрегата, отнимающего значительную долю работы расширения газа в проточной части турбины, особенно если это турбокомпрессор, который удобнее всего размещается на одном валу с турбиной. Наконец, эффективность степени расширения зависит не только от давления конца расширения, но и от давления начала расширения, где высокое давление сопровождается высокими температурами. Если в поршневом двигателе рабочий ход с высокой температурой газа чередуется с ходом выхлопа или продувки, охлаждающими стенки цилиндра, то в газовой турбине горячие газы действуют непрерывно и это требует от металла особо жароупорных качеств; снижение же температуры начала расширения уничтожает эффект глубокого расширения.

Все эти трудности могли быть преодолены только в процессе длительной работы сначала отдельных лиц, а позднее крупных творческих коллективов.

К числу совершенно преждевременных попыток создать газовую турбину следует отнести работу англичанина Джона Барбера, получившего еще в 1791 г. патент на практически неосуществимую газовую турбину.

Первая попытка реализации газовой турбины была сделана инженер-механиком русского флота П. Д. Кузьминским, спроектировавшим и построившим в 1897 г. небольшую радиальную газопаровую турбину с постоянным давлением сгорания. Камера сгорания турбины Кузьминского (рис. 7-29), которую он наименовал «газопарород», охлаждалась спиральными змеевиками, по которым подводилась вода, нагревавшаяся к моменту поступления в камеру до состояния, близкого к испарению. В конической полости камеры сгорания осуществлялся факел за счет горения нефти, подаваемой под давлением нефтяной форсункой. Смесь из продуктов сгорания нефти и водяного пара поступала по цилиндрическим каналам в верхнюю часть «газопаророда», откуда она при давлении 10 *ата*, поддерживаемом работой компрессора, поступала на лопатки газовой турбины. Смерть изобретателя в 1900 г. не позволила ему привести свое изобретение к законченному виду и преодолеть трудности, среди которых основным, как он указывал, было отсутствие жароупорных сплавов.

Газовая турбина начинала привлекать к себе внимание целых коллективов инженеров; в середине XX в. были обнаружены чертежи газопарогенератора, на который в 1909 г. была выдана привилегия Петербургскому металлическому заводу.

За границей еще в 1872 г. германский патент на газовую турбину получил немецкий инженер Штольц, который в 1900—1904 гг. делал попытки ее реализации, но оставил их вследствие весьма низкого к. п. д.

Не превышал 3—4% к. п. д. газовой турбины быстрого сгорания мощностью 25 л. с., которая была построена

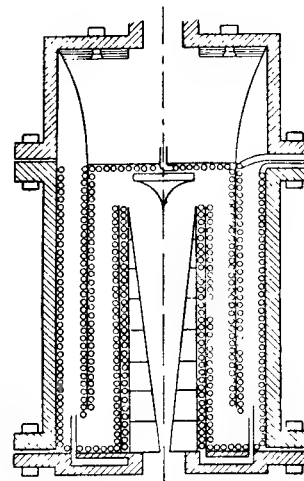


Рис. 7-29. Газопарород (камера сгорания турбины) А. Д. Кузьминского.

в 1906 г. французскими инженерами Арманго и Лемалем; низкий к. п. д. установки был следствием низкого к. п. д. компрессора (50—60%).

Газовая турбина быстрого сгорания была изобретена в 1906 г. во Франции инж. В. В. Караводины. Осуществленная в 1908 г. (2,4 л. с., 10 000 об/мин), она показала к. п. д., едва превышавший 3%.

Много труда на разработку газовой турбины положил в Германии проф. В. Шюле, стоявший на позиции комбинирования на одном валу паровой и газовой турбин, от которого он ожидал экономического к. п. д. порядка 30%.

В Германии же в течение ряда лет над проблемой газовой турбины работал инж. Гольцварт, достигший экономического эффекта, сопоставимого с эффектом паросиловых установок. В период 1914—1920 гг. по его проектам было построено несколько газовых турбин мощностью до 2 000 л. с., к. п. д. которых достигал величины 13—14%.

Указанные попытки, как и ряд других такого же рода, знаменовали собой подготовительный период, и только начиная с 30-х годов XX в. появилась реальная возможность сооружения экономических газовых турбин. В круг работ этого подготовительного периода входили: разработка и анализ наиболее выгодных циклов газовых турбин, экспериментальное исследование свойств рабочих тел в достаточно широком диапазоне температур и давлений, повышение к. п. д. компрессорных установок и освоение технологии производства жароупорных сталей.

7.7. РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ТЕПЛОТЕХНИКИ

Нами рассмотрены исторические факты развития теплоэнергетики во второй половине XIX в. В отдельных случаях рассмотрение вторгалось в XX в. Это объясняется тем, что с конца XIX в. начинает быстро формироваться новая, комплексная энергетика, заключающаяся в возникновении и быстром развитии электроэнергетики. Проведение жесткой грани между «доэлектрическим» и «электрическим» периодами развития энергетики невозможно. Поэтому выше были рассмотрены заводские и транспортные применения паровых турбин и двигателей внутреннего сгорания, продолжающиеся и в XX в., но почти не были рассмотрены начавшиеся в XIX в. применения этих двигателей для привода электрических генераторов.

Последующие главы покажут сильнейшее влияние электрификации на развитие теплосиловых установок. Это влияние проявилось и в области теоретических основ теплоэнергетики — технической термодинамике, науке о распространении теплоты, теоретических основах расчета и проектирования теплосиловых установок и их ведущих агрегатов.

Сейчас следует остановиться на развитии теоретических основ теплоэнергетики «доэлектрического» периода.

Развитие науки о паровых котлах было показано в конце раздела, посвященного развитию котлоагрегатов, поскольку их теоретические основы, включающие исследование процессов парообразования, теплообмена, горения, динамики жидкой, паровой и газовой сред, отличны от теоретических основ тепловых двигателей (паровых машин, паровых турбин и двигателей внутреннего сгорания), к развитию которых мы переходим.

После открытия закона сохранения и превращения энергии (см. гл. 3) и разработки теоретической термодинамики, основанной на ее первом и втором принципах, теоретические работы в области паровых машин проводились преимущественно в области всемерного сокращения расхождения между данными теоретических циклов и практическими индикаторными диаграммами построенных и исследованных машин. Поскольку это расхождение являлось в основном следствием теплообмена между паром и стенками цилиндра, то основные работы по исследованию поршневых паровых машин были направлены на изучение этого сложного явления. Кроме уже упоминавшихся в гл. 3 фундаментальных работ Гирна во Франции и Цейнера в Германии, следует отметить исследования Кларка в Англии и Ишервуда в США. С 80-х годов XIX в. начали организовываться учебно-научные лаборатории при высших инженерных школах США, Англии, Германии, Бельгии, Франции и России, в которых проведено было громадное количество исследований паровых машин, нашедших свое отражение в многочисленной научной и учебной литературе.

К числу наиболее точных и глубоких опытов калориметрического анализа паровых машин следует отнести работы Б. Донкина, Каллендара и Никольсона (США), Шредера и Кооба (Германия). Работы Каллендара и Никольсона были направлены также на исследование термодинамических свойств водяного пара.

В России, кроме упоминавшихся общих исследований В. И. Гриневецкого и И. А. Вышнеградского, следует отметить работы И. А. Гиме и А. А. Радцига по теплообмену в паровых машинах, А. Ф. Брикса, А. В. Гречанинова и В. Карташова по парораспределению, П. В. Котурницкого, А. И. Сидорова и К. Э. Рериха по регулированию, А. А. Угарова и И. Н. Бутакова по исследованию работы многоцилиндровых машин методом совокупных диаграмм, а также большое число исследований ряда выдающихся специалистов по паровозным машинам.

Ряд условий, определивших прогресс двигателей внутреннего сгорания в России, выдвинул выдающихся отечественных теоретиков в области теплового и механического расчетов этих двигателей. Работы профессоров Н. А. Быкова и Г. Ф. Делпа, инж. Д. Д. Филиппова, с самого начала отечественного дизелестроения глубоко исследовавших теорию новых двигателей, были особо отмечены в докладах на съезде деятелей дизелестроения самим Р. Дизелем, приехавшим в Россию.

В 1907 г. профессор МВТУ В. И. Гриневецкий разработал научный метод теплового расчета двигателя внутреннего сгорания, впоследствии развивавшийся и углублявшийся в трудах ряда ученых.

Двухтактные дизели, несмотря на теоретическую возможность получения вдвое большей мощности в цилиндре тех же размеров, что и у четырехтактного двигателя, получали медленное распространение из-за отсутствия достаточно эффективных и надежных методов продув-

ки. С увеличением числа оборотов двигателей клапанная продувка оказалась совершенно несостоятельной. Введенная заводом Нобеля прямая продувка получила свое теоретическое обоснование в работах профессоров В. Л. Матеева и Г. А. Гельда и была широко внедрена в практику дизелестроения, особенно для судовых установок.

В развитии теории паровых турбин громадная заслуга принадлежит чешскому ученому А. Стодоле. Работы других зарубежных ученых по этому вопросу уже были отмечены выше. В России теорией паровых турбин занимались: проф. Н. А. Быков, впервые в России начавший чтение систематического курса паровых турбин; А. А. Радциг, автор одного из первых русских учебников по паровым турбинам; М. И. Яновский (впоследствии член-корреспондент АН СССР), автор новых методов расчета на прочность деталей паровых турбин и глубоких исследований работы конденсационных установок.

Таким образом, несмотря на громадное отставание царской России от передовых в техническом отношении капиталистических стран по внедренной мощности теплосиловых установок, в России сложилась небольшая, но сильная и прогрессивная научная школа теплотехников, позволившая позднее, в условиях социалистического государства, быстро и на высоком научном уровне подготовить многочисленные и высококвалифицированные научные и инженерные кадры.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ЗАРОЖДЕНИЕ ТЕХНИКИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА. НАЧАЛО ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ

8-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Новый, современный, этап в развитии электротехники начался в 90-х годах прошлого столетия, когда была решена проблема передачи электроэнергии на большие расстояния. Этот этап характеризуется все более широким применением электрической энергии во всех областях производства и в быту. Не рассматривая пока социальных изменений, вызванных переходом к широкой электрификации, проследим пути технического решения проблемы концентрированного производства, передачи и использования электрической энергии.

В шестой главе было отмечено, что опыты передачи электроэнергии переменным однофазным током показали принципиальную возможность решения этой задачи, но трудность состояла в том, что не было приемлемых для практики двигателей переменного тока. Следовательно, для того чтобы более полно и глубоко реконструировать промышленность и не ограничивать потребления электроэнергии только осветительными и нагревательными приборами, необходимо было построить двигатель переменного тока. Из современной электротехники известно, что вра-

щающий момент в двигателе переменного тока можно получить в том случае, если будет создано вращающееся магнитное поле. Если в такое поле поместить, например, медный цилиндр, то в последнем будут наводиться токи и в соответствии с законом Ленца он начнет вращаться в направлении вращения поля. На этом принципе построен асинхронный двигатель.

К открытию физического принципа, на котором основана работа асинхронного двигателя, ученые подошли не сразу.

8-2. ИЗОБРЕТЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Открытие явления вращающегося магнитного поля

Имеются сведения, что еще в XVIII и начале XIX вв. было замечено тормозящее влияние медного корпуса компаса на колебания магнитной стрелки и наблюдались взаимодействия между немагнитными металлами и магнитной стрелкой при их взаимных перемещениях. Наиболее интересный опыт произвел французский физик Д. Ф. Араго (см. гл. 4), открывший явление, названное им «магнетизмом вращения». В опыте Араго в том случае, когда вращение медного диска происходило при вращении находящегося вблизи него постоянного магнита, был уже заложен принцип асинхронного электродвигателя с вращающимся магнитным полем. Однако здесь вращающееся поле создавалось не неподвижным устройством, каким в современных машинах является статор, а вращающимся магнитом.

Долгое время явление, открытое Араго, не находило себе практического применения. Только в 1879 г. была сделана попытка усовершенствовать опыт Араго как раз таким образом, чтобы получить вращение магнитного поля с помощью неподвижного устройства. В этом году У. Бейли (Англия) сконструировал прибор, в котором пространственное перемещение магнитного поля осуществлялось путем поочередного намагничивания четырех расположенных по периферии круга электромагнитов. Намагничивание производилось с помощью импульсов постоянного тока, посылаемых в обмотки электромагнитов специально приспособленным для этого коммутатором. Внешний вид прибора Бейли представлен на рис. 8-1. Полярность верхних концов стержней изменялась в определенной последовательности так, что через каждые восемь переключений коммутатора магнитный поток изменял свое направление в

пространстве на 360° . На рис. 8-2 показаны полярности стержней и направления потока для первых четырех положений коммутатора. Над полюсами электромагнитов, как и в опытах Араго, был подвешен медный диск. Бейли указывал, что при бесконечно большом числе электромагнитов можно было бы получить равномерное вращение магнитного поля.

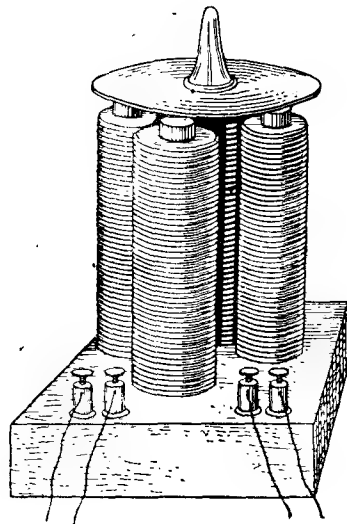


Рис. 8-1. Прибор Бейли.

Описанное устройство было настолько технически несовершенным, что прибор Бейли, не получив никакого применения и остался физической игрушкой. Тем не менее это было некоторое связующее звено между опытом Араго и более поздними исследованиями.

К открытию явления вращающегося магнитного поля в современном его понимании пришли независимо друг от друга итальянский ученый Г. Феррарис и югославский ученый и изобретатель, работавший большую часть жизни в Америке, Н. Тесла.

Феррарис указывал, что способ получения вращающегося магнитного поля он нашел в 1885 г., но впервые он сообщил о своем открытии в докладе Туринской академии наук в марте 1888 г. Два месяца позже, в мае того же года, с изложением существа своих открытий выступил Тесла, хотя идеи о бесколлекторном электродвигателе переменного тока у него появились еще в 1882 г.

Феррарис и Тесла в результате своих исследований показали, что если две катушки, расположенные под прямым углом друг к другу, питать двумя переменными синусои-

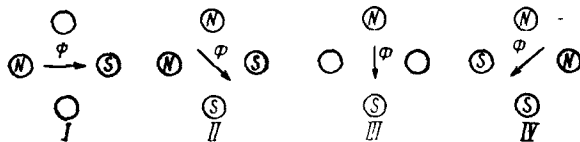


Рис. 8-2. Пространственное положение магнитного потока в приборе Бейли для четырех (из восьми) последовательных моментов.

дальными токами, отличающимися друг от друга только по фазе, и если этот фазный сдвиг составляет ровно 90° , то вектор суммарной магнитной индукции в точке пересечения осей этих катушек получает равномерное вращательное движение, не изменяясь, однако, по абсолютной вели-

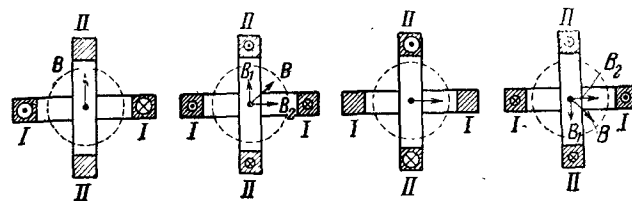


Рис. 8-3. Вращение результирующего вектора индукции B в двухфазной системе.

чине (рис. 8-3). Так, было установлено, что с помощью двух или более переменных токов можно получить непрерывно вращающееся магнитное поле. Минимально необходимое для этого число токов равно двум. Поэтому вполне естественно, что исследование многофазных систем началось с двухфазной системы.

На рис. 8-4 представлена схема двухфазного двигателя Феррариса, где видны две пары взаимно-перпендикулярных катушек $1-1'$ и $2-2'$ и полый медный цилиндр 3, сидящий на валу 4. То, что каждая фаза разбита на две последовательно соединенные катушки ($1-1'$ или $2-2'$), не имеет принципиального значения: достаточно подвести к катушкам $2-2'$ ток, отличающийся по фазе от тока в катушках $1-1'$ на 90° , как во внутренней полости катушек возникнет вращающееся магнитное поле и медный цилиндр (ротор) начнет вращаться. Измерения показали, что двигатель развивал мощность около 3 вт. Но как получить два тока, отличающиеся по фазе на 90° или по крайней мере на угол, близкий к 90° ? Феррарис решает эту задачу двумя путями. В одном случае катушки $1-1'$ включались в первичную цепь трансформатора с разомкнутой магнитной системой, а катушки $2-2'$ — во вторичную¹; в другом — в цепь

¹ Для того чтобы этот сдвиг был по возможности близок к 90° , обмотка катушек $2-2'$ имела большее сопротивление, чем обмотка катушек $1-1'$. Благодаря этому во вторичную цепь трансформатора вводилось большое активное сопротивление, что приводило к уменьшению фазного сдвига в этой цепи.

первой катушки включалось добавочное активное сопротивление, а в цепь второй — добавочное индуктивное сопротивление.

Таким образом, одна возможность получить двухфазную систему токов состояла в «расщеплении» обычного однофазного переменного тока; при этом создавалась так называемая искусственная или вспомогательная фаза.

Этот метод требовал дополнительных довольно сложных устройств для «расщепления» фаз, и, кроме того, фазный сдвиг практически никогда не составлял 90° , что приводило к искажению вращающегося поля.

Но не эти недостатки (на которые собственно сначала и не обратили внимания) помешали Феррарису и некоторым его современникам разработать конструкцию промышленного двухфазного электродвигателя. В своем теоретическом исследовании Феррарис предположил, что электрический двигатель, так же как это принято для электрических устройств в технике слабых токов, должен работать не при максимальном к. п. д., а при максимальной полезной мощности. Простые математические преобразования показывали, что такому

Рис. 8-4. Схематический разрез двухфазного асинхронного двигателя Феррариса.

1—1' — катушки из проволоки большего сечения; 2—2' — катушки из проволоки меньшего сечения; 3 — полый медный цилиндр; 4 — вал.

условию удовлетворяет двигатель, ротор которого имеет скольжение, равное 50%, т. е. вращается со скоростью, вдвое меньшей, чем скорость вращающегося магнитного поля. Такой ротор должен был иметь обмотку с большим сопротивлением. Дальнейший математический анализ привел Феррариса к неправильному выводу, что двигатель, построенный на базе использования свойств вращающегося магнитного поля, принципиально не может иметь к. п. д. выше 50%. Естественно, столь низкий к. п. д. не мог удовлетворить электротехников-практиков, и интерес к работам Феррариса заметно ослабел. Так, ошибочное начальное условие в теоретическом анализе на некоторое время задержало развитие прогрессивной по своему существу технической идеи.

Для полноты представлений о развитии двухфазной системы можно добавить, что в 1889—1890 гг. были постро-

ны первые конденсаторные двигатели, в которых сдвиг по фазе осуществлялся с помощью конденсаторов.

По иному пути пошли некоторые другие изобретатели, и среди них наибольших успехов добился Никола Тесла. Тесла, не прибегая к попыткам получить необходимую разность фаз в самом двигателе, пришел к выводу о целесообразности построения такого генератора, который сразу давал бы, так сказать, в готовом виде два тока с разностью фаз 90° .

Тесла построил двухфазный генератор и питал от него двухфазный асинхронный двигатель. Схематически система

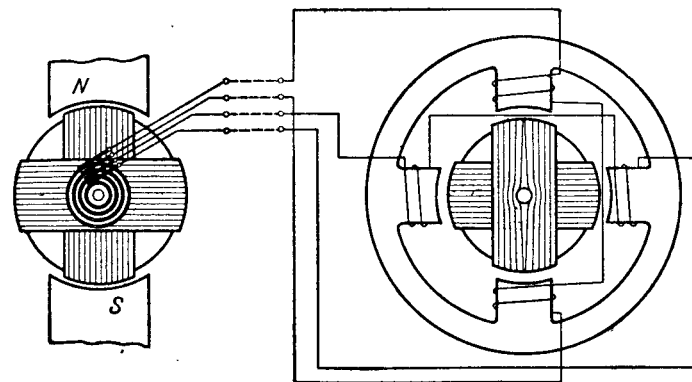


Рис. 8-5. Схема генератора и двигателя Тесла.

Тесла в ее наиболее характерной форме представлена на рис. 8-5; слева изображен синхронный генератор, справа — асинхронный двигатель. В генераторе между полюсами вращались две взаимно-перпендикулярные катушки, в которых генерировались два тока, сдвинутые по фазе на 90° . Концы каждой катушки были выведены на кольца, расположенные на валу генератора (на чертеже для ясности эти кольца имеют различные диаметры).

Ротор двигателя тоже имел обмотку в виде двух расположенных под прямым углом друг к другу замкнутых на себя катушек.

Основным недостатком двигателей Тесла было наличие выступающих полюсов с сосредоточенной обмоткой. Эти двигатели имели очень большое магнитное сопротивление и крайне неблагоприятное распределение намагничивающей силы вдоль воздушного зазора, что приводило к ухудшению характеристик машины. Таковы были следствия меха-

нического переноса в технику переменного тока конструктивных схем машины постоянного тока.

Конструкцию обмотки ротора двигателя тоже нельзя признать удачной. Действительно, выполнение обмоток сосредоточенными (а не распределенными по всей окружности ротора) при наличии выступающих полюсов на статоре приводило к ухудшению пусковых условий двигателя (зависимость величины пускового момента от начального по-

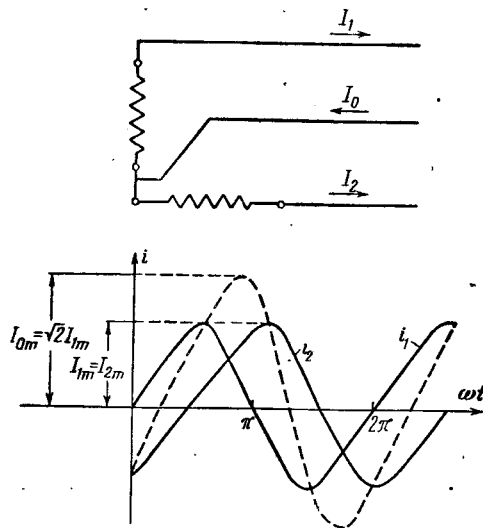


Рис. 8-6. Схема трехпроводной двухфазной цепи и токи в фазах и общем проводе.

ложения ротора), а то обстоятельство, что обмотки ротора имели сравнительно большое сопротивление, ухудшало рабочие характеристики.

Неудачным оказался и выбор из всех возможных многофазных систем двухфазной системы токов. Известно, что значительную долю стоимости установки для передачи электроэнергии составляют затраты на линейные сооружения и, в частности, на линейные провода. В связи с этим казалось очевидным, что чем меньше принятое число фаз, тем меньшим будет число проводов и тем, следовательно, экономичнее устройство электропередачи. Двухфазная система в общем случае требовала применения четырех проводов, а удвоение числа проводов в сравнении с установками постоянного или однофазного переменного токов

представлялось нежелательным. Поэтому Тесла предлагал в некоторых случаях применять в двухфазной системе трехпроводную линию, т. е. делать один провод общим (рис. 8-6). В этом случае число проводов уменьшалось до трех. Однако расход металла на провода при этом снижался меньше, чем можно было ожидать, так как сечение общего провода должно быть примерно в 1,5 раза (точнее, в $\sqrt{2}$ раз) больше сечения каждого из двух других проводов в связи с тем, что синусоидальный ток в общем проводе $\sqrt{2}$ раз больше каждого из двух синусоидальных токов, текущих в других проводах (рис. 8-6).

Встретившиеся экономические и технические трудности задерживали внедрение двухфазной системы в практику. Фирма Вестингауз, где работал Тесла, осуществила несколько установок по его системе, из которых наибольшей по масштабам была Ниагарская гидроэлектростанция.

Выбор оптимальной (трехфазной) системы многофазных токов. Трехфазные асинхронные двигатели

В то время как Тесла и его сотрудники в Америке пытались усовершенствовать двухфазную систему, в Европе была разработана более совершенная электрическая система, а именно система трехфазного тока. Изучение

документальных материалов, относящихся к истории трехфазного тока, показывает, что в 1887—1889 гг. многофазные системы разрабатывались с большим или меньшим успехом несколькими учеными и инженерами.

Например, в Америке Ч. Бредли, руководствуясь стремлением изготовить электрическую машину с лучшим использованием активных материалов, конструировал двух- и трехфазные генераторы. Однако Бредли ничего еще не знал о явлении вращающегося магнитного поля и предполагал, что потребители в его многофазных системах должны включаться как однофазные на каждую пару проводов.

Немецкий инженер Ф. Хазельвандер подошел к трехфазной системе токов с других исходных позиций. Зная, что коллектор у генератора и двигателя постоянного тока выполняет взаимнообратные функции (у генератора он преобразует переменный ток в постоянный, а у двигателя — постоянный в переменный), он решил его устранить. Для этого достаточно те точки обмоток якорей каждой из машин, от которых идут отпайки к пластинам коллектора, соединить соответственно друг с другом. Это удобно сделать у обращенных машин, у которых якоря неподвижны, а полюсы вращаются. Тогда генератор будет связан с дви-

гателем таким числом проводов, которое равно числу коллекторных пластин. Стремясь уменьшить число линейных проводов, Хазельвандер нашел, что минимальным вариантом является применение трех проводов. Однако Хазельвандер не сумел увидеть всех возможностей новой системы и создать пригодные для практики конструкции машин.

Выше указывалось, что Тесла тоже не сумел создать удачные конструкции машин; длительное время он не мог найти пути к связанной¹ трехфазной системе, остановившись перед необходимостью увеличения числа линейных проводов.

Наибольших успехов в развитии многофазных систем добился Михаил Осипович Доливо-Добровольский, который сумел придать своим работам практический характер и явился основоположником техники трехфазного тока.

Осенью 1888 г. Доливо-Добровольский, тогда еще молодой инженер, познакомившись с содержанием доклада Феррариса, не согласился с его выводом о практической непригодности индукционного электродвигателя. Еще до этого Доливо-Добровольский заметил, что если замкнуть коротко обмотку якоря двигателя постоянного тока при его торможении (т. е. в опыте динамического торможения), то возникает тормозящий момент большой величины. «Я тотчас же сказал себе, — вспоминал позднее Доливо-Добровольский, — что если сделать вращающееся поле по методу Феррариса и поместить в него такой короткозамкнутый якорь малого сопротивления, то этот якорь скорее сам сгорит, чем будет вращаться с небольшим числом оборотов. Мысленно я прямо представил себе электродвигатель многофазного тока с ничтожным скольжением».

Следовательно, Доливо-Добровольский пришел к правильному выводу о нецелесообразности изготовления обмотки ротора с таким большим сопротивлением, при котором ротор имел бы скольжение около 50%. Наоборот, если сопротивление обмотки ротора будет небольшим, то уже при незначительном скольжении в стержнях обмотки воз-

¹ Трехфазная цепь, в которой каждая фаза генератора независимо от других соединена двумя проводами со своим приемником, называется несвязанной трехфазной цепью. Если вместо трех отдельных обратных проводов применить один общий провод, то получится четырехпроводная связанная трехфазная цепь. При равномерной нагрузке фаз общий обратный провод может быть устранен, и в этом случае получается трехпроводная связанная трехфазная цепь. Тесла указывал возможности получения систем с любым числом фаз, но ошибочно считал наиболее экономичной и удобной двухфазную систему.

никнут большие токи, которые в достаточно сильном поле статора создадут значительный вращающий момент.

Усиленная деятельность в этом направлении в необычайно короткий срок привела к разработке трехфазной электрической системы и совершенной, в принципе не изменившейся до настоящего времени, конструкции асинхронного электродвигателя.

Первым важным шагом, который сделал Доливо-Добровольский, было изобретение ротора с обмоткой в виде беличьей клетки. С точки зрения уменьшения сопротивления обмотки ротора лучшим конструктивным решением мог бы быть ротор в виде медного цилиндра, как в двигателе Феррариса. Но медь является плохим проводником для магнитного потока статора, и к. п. д. такого двигателя был бы очень низким. Если же медный цилиндр заменить стальным, то магнитный поток резко возрастет, но вместе с тем электрическая проводимость стали меньше, чем меди, и поэтому к. п. д. опять не может быть высоким. Выход из этого противоречия состоял в том, чтобы выполнить ротор в виде стального цилиндра (что уменьшало магнитное сопротивление ротора) и в просверленные по периферии последнего каналы закладывать медные стержни (что уменьшает электрическое сопротивление ротора). На лобовых частях ротора эти стержни должны быть хорошо электрически соединены друг с другом. На рис. 8-7 представлены чертежи из первого патента Доливо-Добровольского в области трехфазной системы. Этим патентом (заявлен 8 марта 1889 г.) Доливо-Добровольский закрепил за собой изобретение ротора с беличьей клеткой, т. е. той конструкции ротора асинхронного двигателя, которая сохранилась принципиально в том же виде и до настоящего времени.

Важнейшим этапом в трудах Доливо-Добровольского явилась замена двухфазной системы трехфазной. Он совершенно справедливо отмечал, что при увеличении числа фаз улучшается распределение намагничивающей силы по окружности статора асинхронного двигателя и использование машины. Уже переход от двухфазной системы к трехфазной дает значительный выигрыш в этом отношении. Дальнейшее увеличение числа фаз не являлось целесообразным, так как оно привело бы к значительному увеличению расхода меди на провода. Вскоре, как будет показано далее, выяснились и другие преимущества трехфазной системы.

Но каким образом проще всего получить трехфазную систему? Уже был известен способ, при помощи которого обычную машину постоянного тока можно было превратить в генератор переменного тока. П. Н. Яблочков и З. Грамм еще в конце 70-х годов (см. гл. 6) секционировали кольцевой якорь генератора и получали от каждой секции переменный ток. В середине 80-х годов были построены

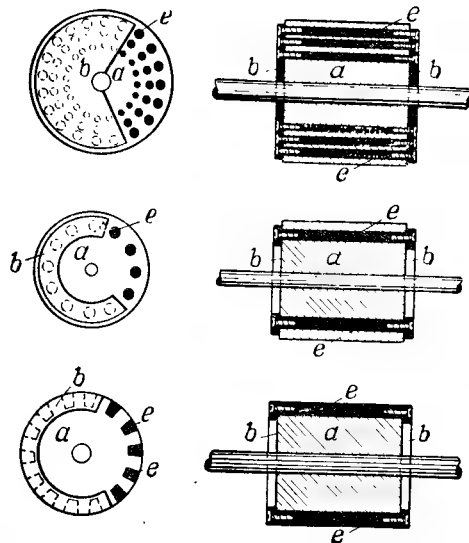


Рис. 8-7. Роторы с обмоткой в виде беличьей клетки (из патента М. О. Доливо-Добровольского).

ки от четырех равноотстоящих точек, то на четырех соответственно кольцах легко получить двухфазный ток (рис. 8-9).

Тесла устраивал синхронный генератор, в котором имелись три независимые катушки, расположенные под углом 60° друг к другу. Такой генератор давал трехфазный ток, но требовал для передачи энергии шесть проводов, так как в этом случае получалась несвязанная трехфазная цепь с токами, отличающимися друг от друга по фазе на 60° .

Доливо-Добровольский в результате исследования различных схем обмоток сделал ответвления от трех равноотстоящих точек якоря машины постоянного тока. Таким образом был получен трехфазный ток с разностью фаз 120° (рис. 8-10). Сохранив в этой машине коллектор, можно

было использовать ее в качестве одноякорного преобразователя, на кольцах которого получался трехфазный ток.

Таким путем была найдена связанная трехфазная система, которая отличается той особенностью, что она требует для передачи и распределения электроэнергии только трех проводов. В двухфазной системе Тесла также имелась возможность обойтись тремя проводами, однако достоинства симметричной связанной трехфазной цепи подкреплялись многими другими преимуществами как двигателей, так и вообще трехфазной системы. Оказалось, например, что на три провода в трехфазной системе при прочих равных условиях требовалось затратить металла на 25% меньше, чем на два провода в однофазной системе¹. Эта очевидная экономия в проводниковой меди в значительной мере способствовала в свое время решению вопроса о выборе системы тока в пользу трехфазной системы.

Дальнейшее увеличение числа фаз, привело бы к некоторому улучшению использования электрических машин, но вызвало бы соответствующее увеличение числа линейных

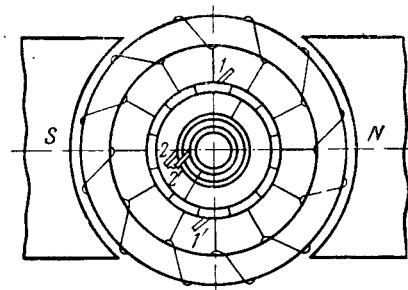


Рис. 8-8. Схема одноякорного преобразователя.

1—1' — щетки со стороны постоянного тока; 2—2' — щетки со стороны переменного тока.

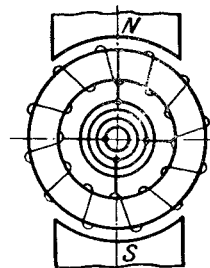


Рис. 8-9. Схема двухфазного одноякорного преобразователя.

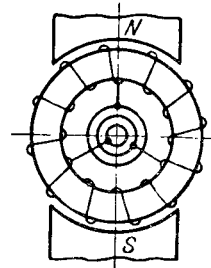


Рис. 8-10. Схема трехфазного одноякорного преобразователя.

¹ Эту экономию в меди легко подсчитать, если иметь в виду, что мощность в трехфазной системе $P_3 = \sqrt{3} U_{l3} \cos \varphi$, а в однофазной $P_1 = U_{l1} \cos \varphi$. При прочих равных условиях для передачи одинаковой мощности в проводах однофазной системы должен проходить ток в $\sqrt{3}$ раз больший, чем в проводах трехфазной системы.

проводов. Таким образом, трехфазная система электрических токов является оптимальной.

Особые свойства системы трехфазного тока, отличающие ее как от системы постоянного тока, так и от системы однофазного переменного тока, в частности, возможность с помощью трехфазного тока получить вращающееся магнитное поле заставили Доливо-Добровольского предложить

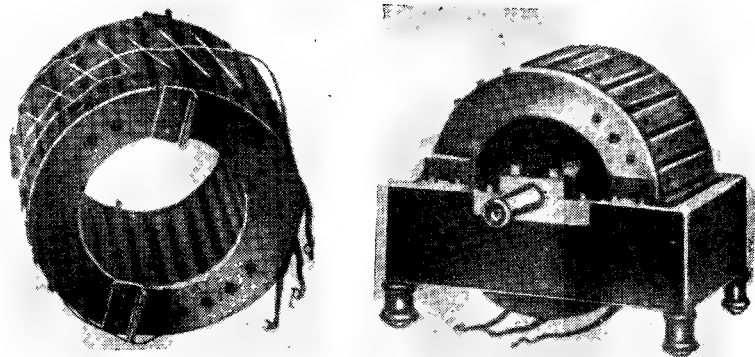
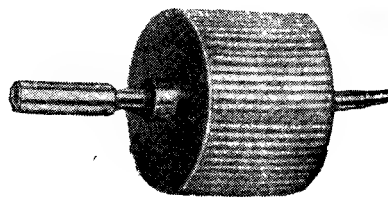


Рис. 8-11. Первый трехфазный асинхронный двигатель М. О. Доливо-Добровольского (в собранном и разобранном видах).



даже новый термин, характеризующий новую систему. Системе «сопряженных» токов (согласно более позднему определению таких трех переменных токов, геометрическая сумма которых в любой момент времени равна нулю) было дано наименование «Drehstrom», что в переводе на русский язык означает «вращающий ток». Указанный термин до настоящего времени сохранился в немецкой литературе.

Весной 1889 г. был построен первый трехфазный асинхронный двигатель мощностью около 100 вт (рис. 8-11). Этот двигатель питался током от трехфазного одноякорного преобразователя и при испытаниях показал вполне удовлетворительные результаты.

Вслед за первым преобразователем был построен второй, более мощный, а затем стали строиться трехфазные синхронные генераторы. Уже в первых генераторах применялись два основных способа соединения обмоток: в звезду и в треугольник. В дальнейшем Доливо-Добровольскому удалось улучшить использование статора с помощью широко применяемого в настоящее время метода, заключающегося в том, что обмотку делают разрезной и противоположащие катушки соединяют встречно (рис. 8-12).

Важным достижением Доливо-Добровольского явилось также то, что он отказался от выполнения двигателя с выступающими полюсами и сделал обмотку статора распределенной по всей его окружности, благодаря чему значительно уменьшилось магнитное рассеяние в сравнении с двигателями Тесла. Так, трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором получил почти современные конструктивные формы. Вскоре Доливо-Добровольским было внесено еще одно усовершенствование: кольцевой тип обмотки статора был заменен барабанным. После этого асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в своих принципиальных частях не менялся.

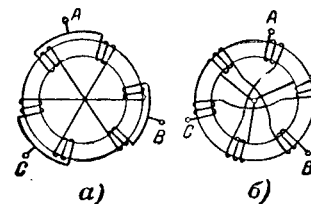


Рис. 8-12. Разрезная обмотка статора.

а — соединение треугольником;
б — соединение звездой.

Новое затруднение в развитии техники трехфазного тока возникло в связи с ограниченной мощностью первых источников тока: как отдельных генераторов, так и электростанций в целом. Дело в том, что при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором пусковой ток может в несколько раз превышать номинальный. Чем больше начальный пусковой ток в сравнении с номинальным током и чем больше двигателей включается в какую-либо сеть, тем больше должна быть мощность этой сети, чтобы включение двигателей меньше отражалось на работе других потребителей. Уже в случае применения машин мощностью свыше 2—3 квт следует принимать специальные меры для уменьшения бросков тока и связанного с этим снижения напряжения в сети.

М. О. Доливо-Добровольский в 1890 г. изготовил двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью примерно

3,7 квт и при первом же испытании установил значительное ухудшение пусковых свойств. Причина этого согласно определению изобретателя заключалась в том, что короткозамкнутый ротор был «слишком замкнут накоротко». При увеличении сопротивления обмотки ротора пусковые

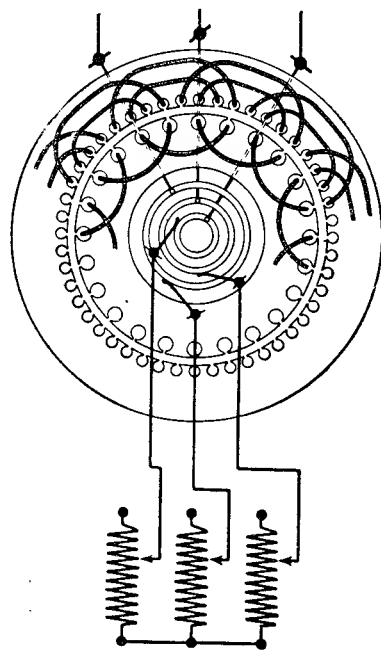


Рис. 8-13. Трехфазный асинхронный двигатель М. О. Доливо-Добровольского с фазным ротором и пусковым реостатом.

условия заметно улучшались, но рабочие характеристики двигателя ухудшались. Анализ возникших затруднений привел к созданию так называемого фазного ротора, т. е. такого ротора, обмотка которого делается, подобно обмотке статора, трехфазной и концы которой соединяются с тремя кольцами, насаженными на вал. С помощью щеток эти кольца соединяются с пусковым реостатом. Таким образом, в момент пуска включается в цепь ротора большое сопротивление, которое выводится по мере нарастания скорости. На рис. 8-13 представлена схема трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором и пусковым реостатом.

Но фазный ротор требовал устройства на валу двигателя контактных колец, и это рассматривалось многими электротехниками как недостаток в сравнении с короткозамкнутым ротором, не имеющим никаких трущихся контактов. Однако с этим недостатком пришлось мириться, и, несмотря на то, что впоследствии были разработаны различные меры по улучшению условий пуска крупных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, двигатели с контактными кольцами широко применяются в промышленности до настоящего времени.

8-3. ИЗОБРЕТЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Система трехфазного тока не имела бы в первые же годы своего существования быстрого и широкого успеха, если

бы она не решала проблемы передачи энергии на большие расстояния. Но электропередача выгодна при высоком напряжении, которое в случае переменного тока получается при помощи трансформатора. Трехфазная система не представляла принципиальных затруднений для трансформирования энергии, но требовала трех однофазных трансформаторов вместо одного при однофазной системе. Такое увеличение числа довольно дорогих аппаратов не могло не вызывать стремления найти более удовлетворительное решение.

В 1889 г. Доливо-Добровольский изобрел трехфазный трансформатор. Вначале это был трансформатор с радиальным расположением сердечников (рис. 8-14,а); его конструкция еще напоминает машину с выступающими полюсами, в которой устранен воздушный зазор, а обмотки ротора перенесены на стержни. Затем было предложено несколько конструкций так называемых «призматических» трансформаторов, в которых удавалось получить более компактную форму магнитопровода (рис. 8-14,б—г). Наконец, в октябре 1891 г. была сделана патентная заявка на трехфазный трансформатор с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости (рис. 8-14,д). В принципе эта конструкция сохранилась до настоящего времени.

Целям электропередачи отвечали также работы, связанные с изучением схем трехфазной цепи. В 80—90-х годах прошлого века значительное место занимала осветительная нагрузка, которая часто вносила существенную несимметрию в систему. Кроме того, иногда было желательно иметь в своем распоряжении не одно, а два напряжения: одно — для осветительной нагрузки, а другое, повышенное — для силовой.

Для того чтобы иметь возможность регулировать напряжение в отдельных фазах и располагать двумя напряжениями в системе (фазным и линейным), Доливо-Добровольский разработал в 1890 г. четырехпроводную схему трехфазной цепи или, иначе, систему трехфазного тока с нулевым проводом. Сразу же он указал, что вместо нейтрального или нулевого провода можно использовать землю. Доливо-Добровольский обосновал свои предложения доказательством того, что четырехпроводная трехфазная система позволяет допускать определенную несимметрию нагрузки; при этом напряжение на зажимах каждой фазы будет оставаться неизменным. Для регулирования напряжения в отдельных фазах четырехпроводной системы Доливо-Доб-

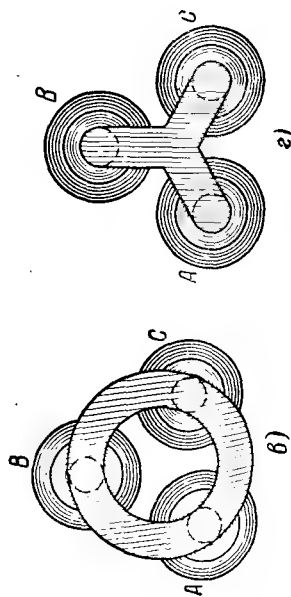
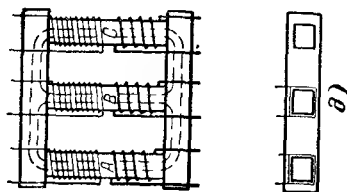
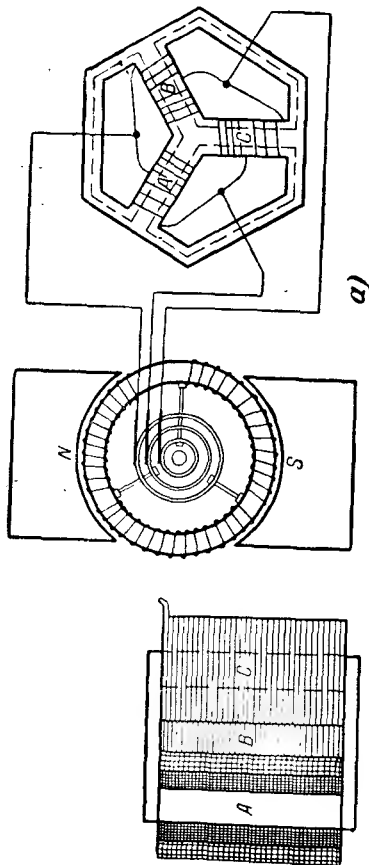


Рис. 8-14. Трансформаторы М. О. Доливо-Добровольского.

а — с радиальным расположением сердечников; б — с «призматическим» типом; в — с параллельным расположением стержней в одной плоскости.

Добровольский предложил использовать изобретенный им трехфазный автотрансформатор (рис. 8-15).

Таким образом, в течение 2—3 лет были конструктивно разработаны все основные элементы трехфазной системы электроснабжения: трансформатор, трехпроводная и четы-

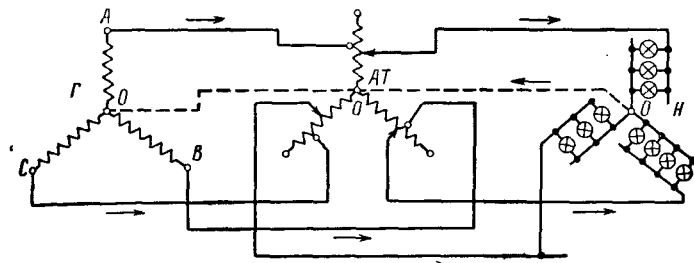


Рис. 8-15. Четырехпроводная трехфазная цепь с автотрансформатором.

Г — генератор; АТ — автотрансформатор; Н — нагрузка.

рехпроводная линии передачи и асинхронный двигатель в двух его основных модификациях (с фазным и короткозамкнутым ротором). Из всех возможных конструкций многофазных синхронных генераторов, принцип построения которых был уже задолго до того известен, получили широкое практическое применение только трехфазные машины. Так зародилась и получила свое начальное развитие техника трехфазного тока.

Изучение истории техники трехфазного тока показывает, что решающую роль в ее зарождении и развитии сыграли труды М. О. Доливо-Добровольского. Он не только разработал основные элементы системы трехфазного тока, но и сделал ряд важнейших изобретений в области техники постоянного тока, в области электроизмерительной техники; ему принадлежат также некоторые другие работы, с которыми мы познакомимся ниже. Несомненно, столь быстрый и полный успех трудов М. О. Доливо-Добровольского во многом определяется тем обстоятельством, что его труды отвечали основным требованиям эпохи. Действительно, Доливо-Добровольский начал свою инженерную и научную деятельность в тот период, когда развивавшиеся производительные силы общества ставили перед новой областью техники — электротехникой — все новые и более ответственные задачи. Основное направление работ Доливо-Добровольского совпало с главным направлением в развитии электроэнергетики. Кроме того, нельзя упускать из виду, что Доливо-Добровольский работал в условиях наиболее развитой в то время германской электротехнической промышленности и, являясь одним из технических руководителей крупнейшей электротехнической фирмы, располагал большими возможностями для экспериментального исследования и практической реализации своих изобретений. В то время как многим его современникам не доставало либо инженерного подхода к решению

возникавших проблем (Бредли, Тесла), либо материально-технической базы (Хазельвандер), у Доливо-Добровольского было и то и другое, помноженное на его глубокие знания теории и огромную работоспособность.

8-4. ПЕРВАЯ ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ТРЕХФАЗНЫМ ТОКОМ

Генеральным испытанием трехфазной системы явилась Лауфен-франкфуртская экспериментальная электропередача. Этот выдающийся для своего времени эксперимент был приурочен к Международной электротехнической выставке и Международному конгрессу электротехников, которые проводились в 1891 г. во Франкфурте-на-Майне (Германия).

Организаторы франкфуртской выставки по инициативе видного немецкого электротехника О. фон Миллера предложили фирме АЕГ, в которой в то время работал Доливо-Добровольский, передать посредством электричества энергию водопада на р. Неккар (близ местечка Лауфен) на территорию выставки во Франкфурт. Расстояние между этими двумя пунктами составляло 170 км. В Лауфене в распоряжение строителей передачи выделялась турбина, дававшая полезную мощность около 300 л. с.

Ответственность поставленной задачи выявляется более отчетливо, если учесть, что до этого времени дальность электропередачи, не считая нескольких опытных установок, не превышала 15 км. Наиболее осведомленные о новейших достижениях в области электропередачи лица выражали опасение, что к. п. д. установки может оказаться ниже 50%, а один германский специалист даже подсчитал, что при расстоянии 170 км к. п. д. электропередачи при напряжении около 30 кВ не будет превышать 12,5%.

Правление фирмы АЕГ согласилось осуществить электропередачу, и Доливо-Добровольскому предстояло в течение года спроектировать и построить асинхронный двигатель мощностью около 75 кВт и трехфазные трансформаторы мощностью 100—150 кВА. Изготовление генератора было поручено главному инженеру швейцарского завода «Эрликон» Ч. Броуну, который сотрудничал с Доливо-Добровольским в области конструирования многофазных машин. Срок был чрезвычайно коротким, а задачи — весьма ответственными: во-первых, новая система тока должна была подвергнуться испытанию перед лицом представителей всего мира; во-вторых, масштабы испытания были не-

данними. Двигатели и трансформаторы на такие мощности еще никогда не строились. Об опытных конструкциях не могло быть и речи: трансформаторы и двигатели должны были впервые испытываться уже на выставке во Франкфурте, так как в Берлине, у фирмы АЕГ, не было соответствующего трехфазного генератора для опробования двигателя большой мощности. Доливо-Добровольский писал по поводу возникшей задачи: «Если я не хотел навлечь на мой трехфазный ток несмываемого позора и подвергнуть его недоверию, которое вряд ли удалось бы потом быстро рассеять, я обязан был принять на себя эту задачу и разрешить ее. В противном случае опыты Лауфен—Франкфурт и многое, что должно было затем развиваться на их основе, пошли бы по пути применения однофазного тока».

В январе 1891 г. был проведен предварительный опыт, который должен был подтвердить возможность передачи электроэнергии при высоком напряжении. Во дворе завода в несколько рядов была протянута двухпроводная линия длиной в несколько километров. Проведенные испытания на однофазном переменном токе при напряжениях 15—33 кВ дали положительные результаты; немедленно после этих испытаний началось строительство линии Лауфен—Франкфурт.

В августе 1891 г. на выставке впервые зажглись 1000 ламп накаливания, питаемых током от Лауфенской гидростанции; 12 сентября того же года двигатель Доливо-Добровольского привел в действие декоративный водопад. Налицо была своеобразная энергетическая цепь: небольшой искусственный водопад приводился в действие энергией естественного водопада, удаленного от первого на 170 км. Это символизировало новую большую победу человечества над природой. Проблема передачи энергии на большие расстояния была решена.

Что же представляла собой эта первая линия электропередачи с применением трехфазного тока?

На гидроэлектростанции в Лауфене мощность турбины передавалась через коническую зубчатую передачу на вал трехфазного синхронного генератора (230 кВА, 150 об/мин, 95 В, соединение обмотки — звездой). От генератора медные шины вели к распределительному щиту. На последнем были установлены амперметры и вольтметры, свинцовые предохранители и максимально-минимальные токовые реле, воздействовавшие на цепь возбуждения.

В Лауфене и Франкфурте находилось по три трехфазных трансформатора с призматической формой магнитопровода (рис. 8-16). В начале испытаний на каждом конце линий было включено по одному трансформатору мощностью 150 кВА каждый, имеющему коэффициент трансформации 154 в Лауфене и 116 во Франкфурте. Поскольку приборов для измерения высокого напряжения не было, величину вторичного напряжения определяли простым умножением первичного напряжения на коэффициент трансформации. Трансформаторы были погружены в баки, наполненные маслом. Общий вид электрической части электростанции в Лауфене представлен на рис. 8-17.

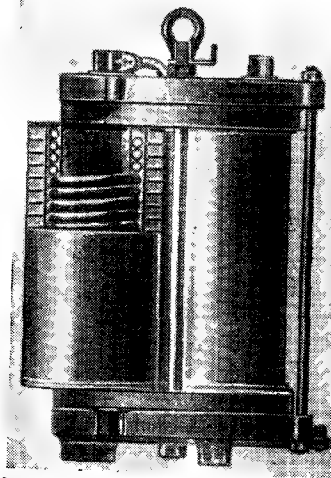


Рис. 8-16. Трансформатор М. О. Доливо-Добровольского для Лауфен-франкфуртской электропередачи.

Трехпроводная линия была проведена на деревянных опорах со средним пролетом около 60 м. Медный провод диаметром 4 мм крепился на штыревых фарфорово-масляных изоляторах (рис. 8-18). Интересной деталью линии являлось устройство плавких предохранителей со стороны высокого напряжения. В начале линии в разрыв каждого провода был включен участок длиной 2,5 м, состоявший из двух медных проволок диаметром 0,15 мм каждая. Для отключения линии во Франкфурте посредством простого приспособления устраивалось трехфазное короткое замыкание, плавкие вставки перегорали, турбина начинала развивать большую скорость, и машинист, заметив это, останавливал ее.

На выставочной площади во Франкфурте был установлен понижающий трансформатор, от которого питались 1 000 ламп накаливания, расположенных на огромном щите. Здесь же был установлен трехфазный асинхронный двигатель Доливо-Добровольского (рис. 8-19), приводивший в действие гидравлический насос мощностью около 100 л. с. Двигатель был выполнен обращенным, т. е. с пи-

танием со стороны ротора¹. Одновременно с этим мощным двигателем Доливо-Добровольский экспонировал асинхронный трехфазный двигатель мощностью около 100 вт с вентилятором на его валу и двигатель мощностью 1,5 кВт с сидящим на его валу генератором постоянного тока; последний питал ток лампами накаливания. Схема всей переда-

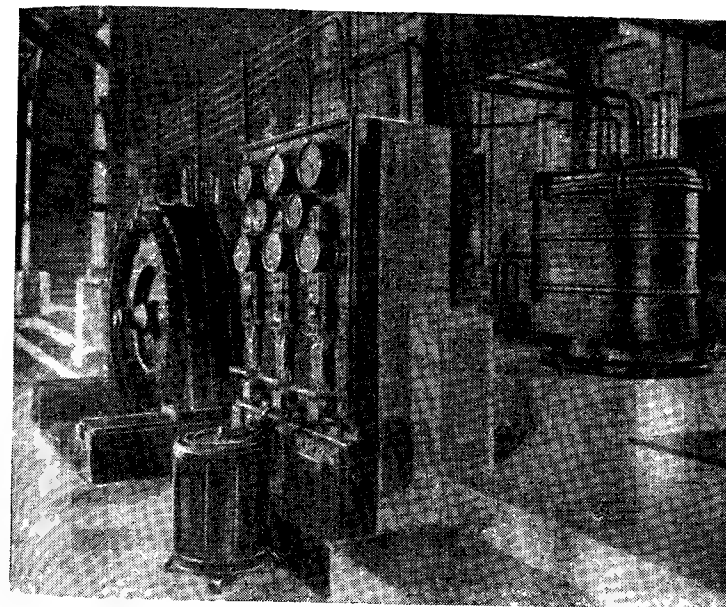


Рис. 8-17. Общий вид электрической части гидроэлектростанции в Лауфене.

Слева — генератор и распределительный щит, справа — трансформатор.

чи (без приборов) для случая ламповой нагрузки представлена на рис. 8-20.

Испытания электропередачи, которые производились Международной комиссией, дали следующие результаты: минимальный к. п. д. электропередачи (отношение мощности на вторичных зажимах трансформатора во Франкфурте к мощности на валу турбины в Лауфене) — 68,5%, макси-

¹ Таким путем были снижены потери в стали двигателя, которые, как известно, тем больше, чем больше объем стали и частота ее перемагничивания. При выполнении двигателя обращенным больший объем стали статора перемагничивается с частотой скольжения, составляющей всего несколько процентов от частоты сети

мальный к. п. д. — 75,2%; линейное напряжение при испытаниях составляло около 15 кв.

Характерен заключительный вывод комиссии: «... работа линии с переменными токами напряжением от 7 500 до 8 500 в (фазное—Авт.), изолированной маслом, фарфором и воздухом, длиной больше ста километров, протекала всегда равномерно, безопасно и без нарушений, как и работа с переменными токами напряжением в несколько сотен вольт и при длине линии в несколько метров».

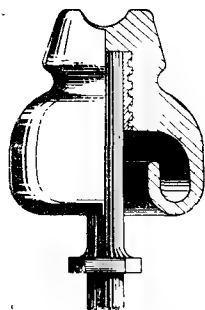


Рис. 8-18. Штыревой фарфорово-масляный изолятор Лауфен-франкфуртской линии.

Однако, получив эти результаты, устроители электропередачи решили провести еще испытание линии на более высоком напряжении. Для этого в Лауфене и Франкфурте включили по два других трансформатора (по 100 ква) таким образом, чтобы их обмотки низкого напряжения соединялись параллельно, а обмотки высокого напряжения — последовательно (см. схему на рис. 8-21). Таким путем удалось получить напряжение, достигавшее 28,3 кв. Нагружали линию при этих испыта-

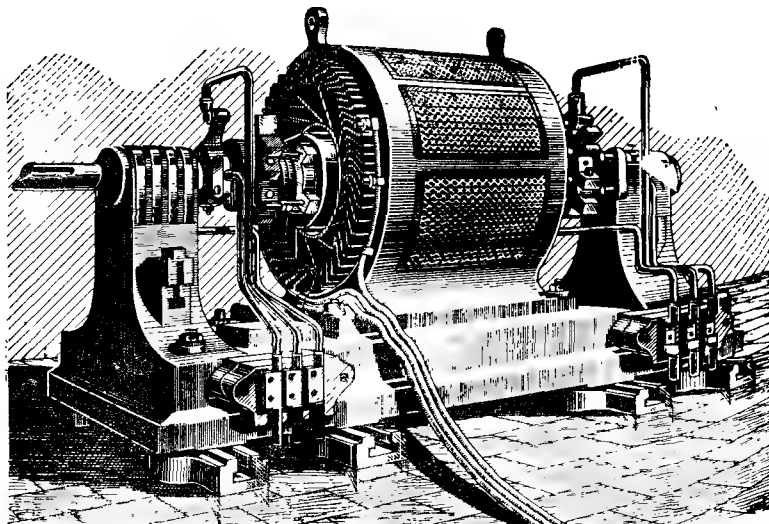


Рис. 8-19. Асинхронный двигатель, изготовленный для Франкфуртской выставки.

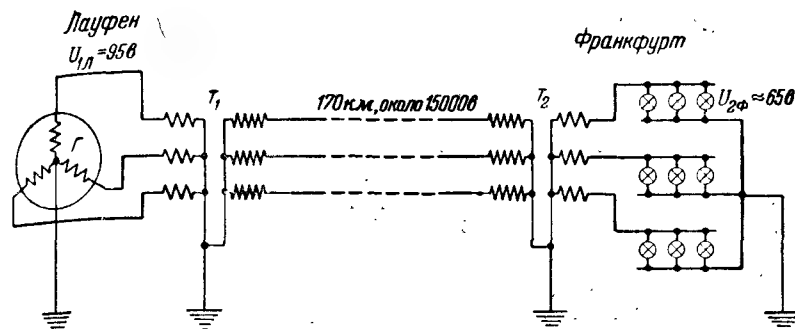


Рис. 8-20. Схема Лауфен-франкфуртской электропередачи.
Г — синхронный генератор; T_1 и T_2 — трансформаторы.

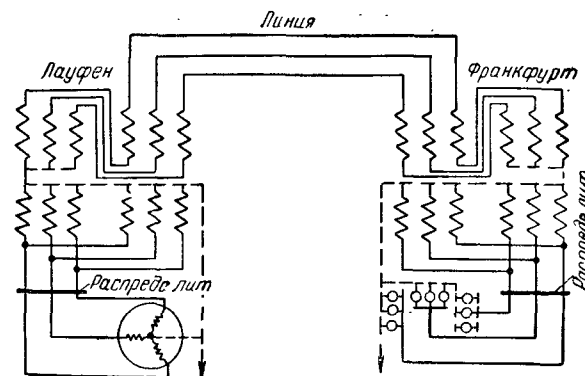


Рис. 8-21. Схема второй серии испытаний электропередачи Лауфен—Франкфурт.

ниях только активной нагрузкой (лампы накаливания). Вторая серия испытаний дала следующий результат: при включенной во Франкфурте нагрузке 132 квт и напряжении на линии передачи 25,1 кв был получен максимальный к. п. д., равный 78,9%.

Интересно отметить, что при испытаниях электропередачи при повышенном напряжении впервые встретились с такими явлениями, как работа синхронного генератора на почти холостую линию (во Франкфурте было включено лишь несколько ламп), когда ток имел емкостной характер, и в связи с этим наблюдались повышение напряжения на зажимах трансформатора, соединенного с генератором одножильными кабелями, и уменьшение потребной мощности возбуждения из-за намагнивающего действия реакции якоря. Кроме того, при пуске ли-

нии путем постепенного увеличения скорости турбины и соединенного с ней генератора наблюдался переход электрической цепи через резонанс. Эти «необычайные», как тогда отмечалось, явления заставили снизить частоту во второй серии испытаний с 40 до 24 гц.

Электропередача Лауфен—Франкфурт подвела итог исследованиям в области многофазных токов. Трехфазный ток был блестяще продемонстрирован представителям многих стран мира. Так, из всех возможных многофазных систем выбор был сделан в пользу системы трехфазного тока. Результаты Лауфен-франкфуртской передачи открыли этому роду тока широкий путь в промышленность.

8-5. РАЗРАБОТКА ОСНОВ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ, МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Если теория постоянного тока начала разрабатываться практически одновременно с первыми открытиями свойств электрического тока, то вопросами теории переменного тока почти совершенно не занимались до второй половины 80-х годов прошлого века. Лишь в отдельных работах Э. Х. Ленца, Б. С. Якоби, Дж. К. Максвелла и некоторых других ученых можно было найти попытки анализа явлений, возникающих в цепях периодически изменяющихся токов.

Так, например, Б. С. Якоби, анализируя процесс наведения э. д. с. в электрической машине, писал в 1835 г.: «Согласно нашим наблюдениям и работам многих других ученых электродвижущая сила магнитно-электрических токов... прямо пропорциональна магнитной интенсивности железных стержней, числу витков и скорости всей системы...» Если иметь в виду, что под «магнитной интенсивностью» Якоби понимал величину магнитного потока, то следует признать, что Якоби дал в общем виде связь между основными величинами, характеризующими работу электрической цепи со сталью. Действительно, если выразить приведенную выше формулировку Якоби в современных символах, то мы получим формулу

$$E = k\omega\Phi,$$

где E — э. д. с.;

ω — угловая скорость якоря электрической машины;

Φ — число витков обмотки;

Φ — магнитный поток.

Постепенно начиналось изучение таких явлений, как самоиндукция, сдвиг фаз, потери в стали. Так, Э. Х. Ленц в 1847 г. установил, что переменный ток, наводимый в обмотках электрических машин, по времени не совпадает с э. д. с. Это было первое наблюдение действия индуктивности. П. Н. Яблочков в 1877 г. наблюдал емкостные явления в цепи переменного тока, но не сумел дать им правильного объяснения. Дж. К. Максвелл в своих исследованиях пользовался представлениями о полном сопротивлении цепи, в которую входили омическое сопротивление и индуктивность. В 80-х годах процессы в цепях с индуктивностью или емкостью были уже использованы для практических целей в электроизмерительной технике в трудах Г. Феррариса, Н. Тесла и других ученых и инженеров, работавших в области многофазных систем.

С 80-х годов началось глубокое изучение магнитных свойств стали, применявшейся в электромашиностроении. Эти исследования были вызваны, в частности, обнаруженными большими расходами между расчетными и опытными величинами потерь в машинах и трансформаторах. Английский ученый Юинг правильно увидел причину этих расходов в неучтенных потерях на гистерезис¹. В 1885 г. были разработаны различные методы, позволившие снимать кривые намагничивания стали; этими кривыми пользовались при расчетах магнитных цепей. В 90-х годах Штейнметцем была предложена эмпирическая формула для определения потерь на гистерезис, которой пользуются по настоящее время.

Однако все эти и некоторые другие открытия еще не могли составить прочную основу для развития теории переменного тока. В условиях многолетнего господства техники постоянного тока явления в цепях переменного тока представлялись чрезвычайно сложными, запутанными, не поддающимися сколько-нибудь точному учету. Такое положение заставляло электротехников находиться в состоянии неуверенности, неверия в перспективы развития техники переменного тока и толкало их на проторенный путь совершенствования техники постоянного тока.

С другой стороны, ожесточенная конкурентная борьба сторонников постоянного тока против развития техники переменного тока приводила порой не только к ошибочным, но и к вредным, задерживавшим прогресс действиям. Так, например, в 1889 г. М. О. Доливо-Добровольский подготовил большой доклад о передаче электроэнергии переменным током, в котором собирался дать решительный отпор скептикам, сомневающимся в экономичности электропередачи переменным током. Но уже подготовленный доклад не был разрешен к зачитанию, так как правление фирмы АЕГ не хотело затрагивать интересов дружественной ей фирмы, специализировавшейся на выпуске машин и аппаратов постоянного тока. А в рукописи этого доклада, между прочим, указывалось, что в ближайшем будущем электродвигатели переменного тока займут господствующее положение в системе электропривода промышленных предприятий.

Все же в конце 80-х годов в разных странах начали появляться первые обобщающие теоретические исследования по переменному току. Существенным недостатком этих первых исследований явилось то, что они выполнялись в сложной математической, трудно читаемой форме и оказывались мало пригодными для практиков. Физическая сущность процессов в этих трудах отодвигалась на задний план.

Определенные успехи в начальном развитии теории переменного тока были достигнуты известным в то время электриком, впоследствии профессором Бирмингемского университета Г. Калпом, который, начиная с 1887 г., провел ряд ценных исследований в области теории трансформатора. В частности, в 1887 г. им была выведена для среднего арифметического значения э. д. с. точная формула, которая в современных обозначениях известна каждому электрику:

$$E = 4\omega f\Phi,$$

где ω — число витков;

f — частота;

Φ — магнитный поток.

¹ Гистерезис был открыт в 1880 г. немецким ученым Варбургом, а само наименование этому явлению было дано Юингом.

На основе этой формулы можно было определить величину магнитного потока в стержнях трансформатора, а затем величину намагничивающего тока.

Большой вклад в развитие теории переменного тока внес Г. Феррарис. В 1886 г. он опубликовал книгу «О разности фаз у токов, о запаздывании вследствие индукции и о потерях в трансформаторе», в которой впервые рассматривались разность фаз у токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора, а также были даны методы расчета потерь на гистерезис и вихревые токи. Позднее, в 1893 г., он исследовал процессы в однофазных двигателях с применением к ним метода вращающихся векторов. Многочисленные исследования Феррариса нашли свое обобщение в фундаментальной монографии «Научные основы электротехники», изданной в 1898 г. и переведенной на русский язык в 1904 г.

Важную роль в становлении современных представлений в области теории переменного тока сыграли исследования М. О. Доливо-Добровольского.

Выступив в 1891 г. на Международном конгрессе электриков во Франкфурте-на-Майне, Доливо-Добровольский в большом докладе изложил развитые и четко сформулированные им основные положения теории переменного тока. Рассматривая катушку, включенную на определенное переменное напряжение, и развивая выводы Каппа, он показал, что величина магнитного потока целиком определяется величиной подведенного напряжения (если считать частоту и число витков заданными). Следовательно, магнитный поток в отличие от случая включения катушки со сталью в цепь постоянного тока не зависит от магнитного сопротивления; с изменением магнитного сопротивления меняется только намагничивающий ток, а поток остается таким же (если пренебречь падением напряжения в обмотке катушки). Это положение, которое Доливо-Добровольский называет первым основным положением теории переменного тока, действительно является исходным во всех расчетах электромагнитных устройств. Далее, он отметил, что если магнитный поток изменяется синусоидально, то э. д. с. (или, соответственно напряжение) изменяется по закону синуса, причем э. д. с. и магнитный поток различаются по фазе на 90° , или на $\frac{1}{4}$ периода, «ибо э. д. с. является функцией скорости, с которой изменяется магнетизм». Исходя из этого, Доливо-Добровольский сформулировал второе важное положение теории переменного тока: «напряжение и магнетизм не только количественно, но и качественно (по форме кривой) и по времени (по фазе) прочно связаны друг с другом».

Если в катушке не происходит тепловых потерь, то намагничивающий ток по фазе совпадает с магнитным потоком. Такой ток Доливо-Добровольский предложил называть «безваттным» или «возбудительным» током. Если же, напротив, весь ток расходуется на нагрев обмотки рассматриваемой катушки и не затрачивается на создание магнитного поля, то такой ток совпадает по фазе с напряжением, и его Доливо-Добровольский предложил называть «ваттным» или «рабочим» током. Эти термины в то время получили весьма широкое распространение, но впоследствии были заменены современными терминами «реактивный» и «активный».

«В действительности, — говорил далее Доливо-Добровольский, — ни возбудительный, ни ваттный ток в отдельности невозможен». Из приведенных рассуждений непосредственно следует метод разложения любого тока на две составляющие. Этот метод и был рекомендован

Доливо-Добровольским для практических расчетов и анализа процессов в электрических машинах и аппаратах.

Доливо-Добровольский рекомендовал принять в качестве основной формы кривой тока синусоиду. В отношении частоты тока он высказался за 30—40 гц .

Вопрос о частоте тока обсуждался довольно долго и вызывал многочисленные споры. Диапазон применявшихся частот был очень широким: от 15—20 до 150 гц и выше. Например, в Америке в 80-х годах довольно широко была распространена частота 133 гц . Затем в результате критического отбора получили применение лишь две частоты промышленного тока: 60 гц в Америке и 50 гц в других странах. Эти частоты оказались оптимальными, ибо повышение частоты ведет к чрезмерному возрастанию скоростей электрических машин (при том же числе полюсов), а снижение частоты неблагоприятно сказывается на равномерности освещения.

Несколько позднее, в 1892 г., Доливо-Добровольский разработал на базе сформулированных выше положений основы теории и проектирования трансформаторов. Он убедительно опроверг распространявшееся ошибочное утверждение о том, что трансформаторы принципиально не могут быть экономичными аппаратами в электрических сетях. Теоретическим исследованием «О коэффициенты полезного действия трансформатора» Доливо-Добровольский заложил фундамент современной теории трансформаторов. В 90-х годах трудами ряда ученых (С. Эвершеда, Бен-Эшенбурга, Г. Каппа и др.) были исследованы важнейшие вопросы теории трансформаторов, как-то: магнитное рассеяние, потеря напряжения и введен графический анализ.

В это же время начинают формироваться основы теории трехфазных машин. Еще Доливо-Добровольский дал первоначальный анализ распределения намагничивающей силы в трехфазной машине, исследовал некоторые вопросы параллельной работы синхронных генераторов, разработал руководящие принципы проектирования электрических машин: распределенные по окружности статора и ротора обмотки, возможное уменьшение магнитного рассеяния, уменьшение воздушного зазора в асинхронном двигателе, введение в машины переменного тока барабанного типа обмотки и полукрытых пазов.

Большое значение для развития теории асинхронной машины имела круговая диаграмма, которая дает наглядное представление о важнейших зависимостях между величинами, характеризующими работу машины. Теоретически существование круговой диаграммы для асинхронной машины обосновал в 1894 г. А. Гейланд. Более точную круговую диаграмму, учитывающую все потери в машине, построил в 1899—1900 гг. Осанна. В 1909 г. К. А. Круг дал точное математическое доказательство круговой диаграммы.

Определенную трудность для расчета цепей переменного тока представляло то обстоятельство, что здесь в отличие от цепей постоянного тока приходилось учитывать фазы токов и напряжений. Положение существенно упростилось благодаря введению символического метода расчета цепей переменного тока разработанного Ч. П. Штейнметцом (1897 г.). Этот метод позволяет применять для переменного тока основные законы цепей постоянного тока.

Позднее, уже в 20-х годах текущего столетия, для анализа несимметричных режимов в цепях переменного тока был применен метод симметричных составляющих, предложенный американским ученым Фортеским первоначально для исследования проблем, возникающих при проектировании электрических железных дорог на однофазном токе.

8-6. НАЧАЛО ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ

Зарождение техники трехфазного тока явилось важным этапом в развитии техники. Это новое средство вывело проблему электропередачи, а вместе с ней и электротехнику вообще из кризисного состояния, которое сложилось в 80-х годах прошлого века. Производительные силы получили новую техническую базу, во многом способствовавшую углублению и расширению процесса концентрации и централизации производства. Электрическая энергия, которая из мест ее дешевого получения могла теперь передаваться в удаленные промышленные районы, вызвала коренную реконструкцию энергохозяйства промышленных предприятий и начала внедряться в технологию. Важнейшим следствием возникновения техники трехфазного тока явилась возможность быстрого развития электрификации народного хозяйства. Процесс электрификации постепенно захватывал все новые области производственной деятельности, революционизировал развитие производительных сил и не мог не привести к глубоким социальным изменениям.

Выше (см. гл. 6) были показаны основные особенности и пути развития ранних электростанций постоянного и однофазного переменного токов. Было установлено, что эти станции имели либо очень малый радиус электроснабжения (станции постоянного тока), либо ограниченный круг потребителей (станции однофазного переменного тока). Удовлетворительно решать комплексную проблему электроснабжения позволили только станции трехфазного (вообще говоря, многофазного) тока.

Оставляя пока в стороне вопрос об особенностях основного оборудования электростанций и развитии электрических систем (об этом см. гл. 12 и 13), дадим краткую характеристику первых станций многофазных токов.

Первой эксплуатировавшейся электростанцией трехфазного тока была Лауфенская станция. После закрытия Франкфуртской выставки электростанция в Лауфене перешла в собственность города Хейльбронна, расположенного в 12 км от Лауфена. На гидростанции были установлены два одинаковых трехфазных синхронных генератора, из которых один раньше работал на электропередачу Лауфен—Франкфурт. Напряжение (фазное) при помощи трансформаторов повышалось с 50 до 5000 в. В Хейльбронне электроэнергия использовалась для питания всей городской осветительной сети, а также ряда небольших заводов и ма-

стерских. Понижительные трансформаторы устанавливались непосредственно у потребителей. Эта первая в мире промышленная установка трехфазного тока была пущена в эксплуатацию в начале 1892 г. На рис. 8-22 представлен план и разрез Лауфенской гидроэлектростанции. Внутренний вид станции до ее реконструкции был показан выше (см. рис. 8-17).

В том же 1892 г. была сдана в эксплуатацию электропередача Бюлах—Эрликон (Швейцария). Машины для электростанции были спроектированы еще во время подготовки Франкфуртской выставки швейцарским инженером Ч. Броуном. У водопада в Бюлахе была построена гидроэлектростанция с тремя трехфазными генераторами мощностью 150 кВт каждый. Вырабатывавшаяся электроэнергия передавалась на расстояние 23 км для электроснабжения завода.

Вслед за этими первыми установками трехфазного тока началось довольно быстрое строительство ряда электростанций, причем наибольшее их число было в Германии.

Известные трудности в развитии электрификации на базе трехфазного тока приходилось испытывать в связи с тем, что уже раньше в городах были построены станции постоянного, однофазного или двухфазного тока. Владельцы и акционеры этих станций и электрических сетей всячески препятствовали внедрению техники трехфазного тока. Некоторым выходом из этих затруднений являлось сочетание трехфазной электропередачи с распределением энергии на постоянном токе. Например, 1893 г. в Боккенгейме (пригород Франкфурта) была сооружена электростанция с двумя генераторами трехфазного тока (по 150 кВт). Напряжение при помощи трансформаторов повышалось с 80 до 700 в, и энергия передавалась на подстанцию, находившуюся в центре промышленного района и удаленную от электростанции на 1,2 км. Большая часть энергии на подстанции преобразовывалась двигатель-генераторной установкой в энергию постоянного тока, и последняя распределялась для электрического освещения. Аналогичное решение вопроса было найдено несколько позднее при строительстве электростанции в северной части Берлина.

Первая установка трехфазного тока в Америке была сооружена в конце 1893 года в Калифорнии. Гидроэлектростанция располагала двумя генераторами мощностью по 250 кВт. От электростанции были проведены две линии генераторного напряжения (2500 в). Первая из них дли-

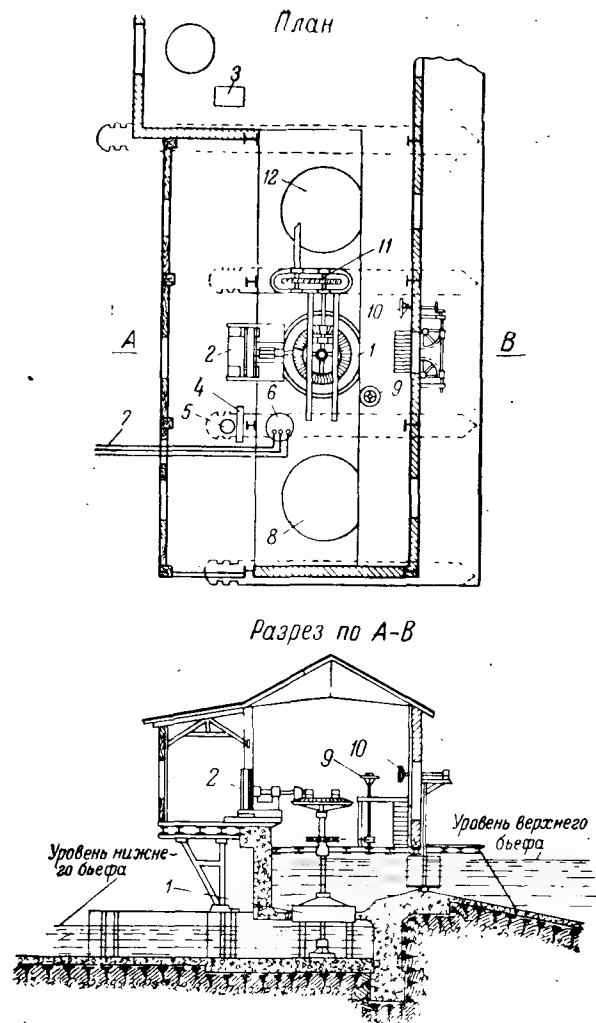


Рис. 8-22. План и разрез Лауфенской гидроэлектростанции.

1—гидротурбина, работавшая во время выставки в Лауфене; 2—генератор; 3—возбудитель; 4—распределительный щит; 5—реостат; 6—трансформатор; 7—линия передачи; 8—место для второго агрегата, установленного в 1892 г.; 9—штурвал для регулирования скорости; 10—штурвал для управления щитовым затвором; 11—передача к резервной турбине; 12—резервная турбина.

ной 12 км поставляла энергию для осветительных целей, а вторая длиной 7,5 км предназначалась для питания трехфазного асинхронного двигателя мощностью 150 квт.

Темпы внедрения трехфазного тока в Америке вначале были заметно ниже, чем в Европе. Это объясняется тем, что в Америке одна из крупнейших фирм — компания Вестингауз — настойчиво пыталась развернуть работы по сооружению электростанций и электрических сетей по системе Тесла. Триумфом двухфазной системы считалась грандиозная по тому времени электростанция на Ниагарском водопаде, пущенная в эксплуатацию в 1896 г. Ниже (см. гл. 12) будет подробнее рассказано об этой гидроэлектростанции. Здесь же лишь отметим, что замечательные свойства системы трехфазного тока привлекли к нему внимание почти всех электротехнических фирм, в том числе и крупнейшей американской фирмы Дженерал Электрик.

Последняя развила бурную деятельность по строительству установок трехфазного тока, и двухфазная система оказалась неконкурентоспособной. Ниагарская гидроэлектростанция со временем была переоборудована на трехфазный ток.

Двухфазная и однофазная системы очень быстро вытеснялись трехфазной. На рис. 8-23 представлены кривые роста числа и мощности центральных электрических станций переменного тока в Германии. Из этих кривых видно, что сначала указанные системы боролись друг с другом с переменным успехом, но примерно с 1898 г. безусловное первенство осталось за системой трехфазного тока.

Несмотря на то, что и после 1891 г. продолжалось строительство электростанций и сетей постоянного тока, качественно определяющей чертой нового периода становится сооружение станций трехфазного тока. Главной причиной

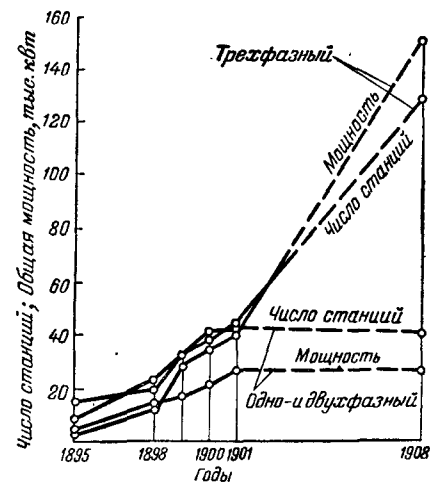


Рис. 8-23. Рост числа и мощности электростанций переменного тока в Германии.

успехов новой системы тока был быстрый рост промышленного потребления электроэнергии, тогда как построенные ранее станции удовлетворяли главным образом потребительские нужды населения. Поэтому первые электростанции трехфазного тока представляли собой чаще всего станции фабрично-заводского типа.

Русские электротехники сумели очень быстро оценить достоинства трехфазной системы. Уже в январе 1892 г. на четвертой Петербургской электротехнической выставке проф. И. И. Борнман демонстрировал трехфазные машины системы Доливо-Добровольского. На этой выставке работали две трехфазные машины мощностью по 15 квт.

Первым предприятием в России, электрифицированным на базе трехфазного тока, был Невороссийский элеватор. Этот элеватор представлял собой грандиозное сооружение, и задача распределения энергии по его этажам и различным зданиям могла быть решена наилучшим образом только при помощи электричества. Строитель элеватора инж. А. Н. Щенснович решил применить только что ставшую известной систему трехфазного тока. Летом 1892 г. швейцарскому заводу фирмы Броун-Бовери было заказано изготовление чертежей трехфазных машин. В следующем 1893 г. элеватор был электрифицирован. Примечательным было то, что все машины по разработанным за границей проектам изготовлялись в собственных мастерских элеватора.

На электростанции, построенной рядом с элеватором, были установлены четыре синхронных генератора мощностью 300 квт каждый. Таким образом, общая мощность электростанции составляла 1 200 квт, т. е. это была в то время самая мощная в мире электростанция трехфазного тока. В помещениях элеватора работали трехфазные двигатели мощностью 3,5—15 квт, которые приводили в действие различные машины и механизмы. Часть энергии использовалась для освещения.

Сам факт сооружения столь мощной и совершенной установки спустя всего 2 года после публичной демонстрации системы трехфазного тока свидетельствует о том, что в России имелись квалифицированные инженерно-технические кадры, которые могли обеспечить технический прогресс страны. Однако общая социально-экономическая отсталость дореволюционной России и порочная политика царского чиновничьего аппарата, ориентировавшаяся только на «западную цивилизацию» и «авторитетные фирмы», делали практически невозможным широкое развитие отечественной электротехники и электропромышленности.

Строившиеся после невороссийской установки электростанции трехфазного тока в России хотя и были совершенными по своему техническому уровню, но оставались немногочисленными. Так, в 1894 г. была осуществлена трехфазная установка на пряжекрасильной фабрике в Мытищах (около 15 квт). В том же году началась эксплуатация установки трехфазного тока на Московском элеваторе (около 150 квт); в 1895 г. был электрифицирован Коломенский машиностроительный завод (550 квт), а в последующие годы — еще несколько предприятий.

Представляет интерес электрификация Охтенского порохового завода в Петербурге; ее организаторы В. Н. Чиков и Р. Э. Классон решили осуществить передачу и распределение энергии трехфазным током. На гидростанции работали два генератора: один мощностью 120 и другой 175 квт. Энергия передавалась на генераторном напря-

жении 2 050 в. Оба генератора могли работать независимо друг от друга, так как были построены отдельные линии, но они могли включаться также и на параллельную работу. Наибольшее расстояние передачи составляло 2,66 км. На заводе находилось девять электродвигателей, из которых один имел мощность 65 л. с., три — по 20 л. с. и пять — по 10 л. с. Кроме того, два двигателя по 1,5 л. с. были установлены на гидростанции для привода щитовых затворов. Часть энергии для питания дуговых ламп преобразовывалась в энергию постоянного тока. Для этой цели в двух отделениях завода были размещены два одноякорных преобразователя мощностью 12 и 22 квт. На территории завода были сооружены трансформаторные будки, в которых находились трансформаторы, понижавшие напряжение до 110 в, предохранители и выключатели.

Охтенская установка представляла собой в то время последнее слово техники; ее основной строитель выдающийся русский инженер Р. Э. Классон дал прогрессивное инженерное решение задачи централизованного электроснабжения промышленного предприятия.

Первой в России электропередачей значительной протяженности была установка на Павловском приiske Ленского золотопромышленного района в Сибири. Электростанция была построена в 1896 г. на р. Ныгра. Здесь были установлены трехфазный генератор 98 квт, 600 об/мин, 140 в и трансформатор соответствующей мощности, повышавший напряжение до 10 кв. Электроэнергия передавалась на прииск, удаленный от станции на 21 км. На приiske для привода водоотливных устройств использовались трехфазные асинхронные двигатели мощностью 6,5—25 л. с. (напряжение 260 в).

Так, постепенно строились в России электростанции трехфазного тока. С 1897 г. началась электрификация крупных городов на базе трехфазного тока (Москва, Петербург, Самара, Киев, Рига, Харьков и др.).

На рубеже XIX и XX вв. были уже достаточно выяснены преимущества и возможности техники трехфазного тока. Развитие городских сетей делало экономически нецелесообразным существование в одном городе многих мелких станций, и они закрывались одна за другой. Электрические станции становились крупными промышленными предприятиями по выработке электроэнергии; сети разных станций объединялись, создавались первые энергетические системы.

Развитие электропривода

Как известно, одними из наиболее распространенных в промышленности являются механические процессы. Поэтому уже в 70—80-х годах прошлого столетия начинает проявляться стремление электрифицировать эти процессы, т. е. осуществить электрический привод различных исполнительных механизмов. Однако до начала 90-х годов применение электропривода носило эпизодический характер. Лишь в некоторых случаях, когда предприятия располагали блок-станциями для электрического освещения, электродвигатели применялись для привода вентиляторов, насосов, подъемников и других механизмов.

Положение изменилось коренным образом в связи с изобретением асинхронного двигателя. В достаточно короткий срок этот тип двигателя занял доминирующее положение в системе электропривода промышленных предприятий. Можно сказать, что именно асинхронный трехфазный электродвигатель и вызвал к жизни ту отрасль электроэнергетики, которая получила наименование «электропривод».

Одним из важнейших преимуществ асинхронного двигателя перед двигателями постоянного тока является отсутствие у него коллектора.

Чрезвычайная простота асинхронного двигателя, особенно с короткозамкнутым ротором, его надежность и невысокая стоимость позволяют установить в любом цехе сотни и тысячи двигателей при небольшом обслуживающем персонале. Такие двигатели могут выполняться в герметических корпусах, и, следовательно, их можно использовать в тяжелых условиях работы: в атмосфере повышенной влажности, бензиновых паров и т. п. Асинхронные двигатели без повреждений выдерживают значительные кратковременные перегрузки, тогда как в двигателях постоянного тока любая перегрузка разрушительным образом сказывается на коллекторе.

Существенным недостатком асинхронного двигателя является трудность регулирования его скорости. Поэтому до настоящего времени еще очень велик удельный вес регулируемых машин постоянного тока в системе промышленного электропривода.

Недостатком асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором также является ограничение их мощности условиями пуска. Это обстоятельство в начальный период развития техники трехфазного тока, когда мощности электрических станций были невелики, заставляло во многих случаях отказываться от применения двигателей с короткозамкнутым ротором. Мощные двигатели с короткозамкнутым ротором применялись только в тех случаях, когда они питались от отдельного генератора, т. е. там, где они запускались вместе с генератором. Такие установки часто устраивались, например, в водокачках.

Были сделаны некоторые попытки повысить мощность двигателей с короткозамкнутым ротором. Так, в 1892 г. М. О. Доливо-Добровольский разработал метод автотрансформаторного пуска асинхронных двигателей, т. е. пуска при пониженном напряжении, но при этом значительно

(пропорционально квадрату напряжения) уменьшался вращающий момент. В 1893 г. Доливо-Добровольский изобрел ротор с двойной беличьей клеткой. Эти изобретения получили некоторое распространение. Однако наиболее совершенный с точки зрения пусковых характеристик тип ротора с двойной беличьей клеткой, равно как и ротор с глубоким пазом, получил весьма широкое развитие только в 20-х годах текущего столетия (см. гл. 13). Основным типом асинхронного двигателя большой мощности в 90-х годах прошлого и начале текущего столетий оставался двигатель с фазным ротором. Двигатели с фазным ротором были удобны еще и потому, что они позволяли в случае необходимости регулировать скорость при помощи реостатов, хотя при этом терялась значительная мощность.

В конце 90-х годов электромашиностроительные заводы уже выпускали асинхронные электродвигатели в значительном количестве и с большим диапазоном мощностей. Характеристики этих электродвигателей были вполне удовлетворительными (например, асинхронные двигатели фирмы АЕГ мощностью 5 л. с. имели к. п. д. 0,85, а $\cos \varphi$ выше 0,9).

Процесс электрификации промышленных предприятий означал одновременно вытеснение из системы промышленного привода паровой машины. Паровой двигатель производственных цехов переходил в машинные залы электростанций, становясь первичным двигателем, дающим энергию вторичным двигателям — электрическим.

Практически развитие электропривода происходило двумя неравнозначными путями. Первый, наиболее типичный путь — замена паровых двигателей, работавших на трансмиссию. Это был путь возникновения крупногруппового электропривода, который не исключал тяжелых производственно-гигиенических условий, определявшихся наличием трансмиссий (рис. 8-24). Второй путь — эпизодическое применение одиночного привода. Последнее, как правило, имело место только в случаях крупных ответственных исполнительных механизмов, предъявлявших специфические требования к приводному двигателю (привод кранов, центрифуг, прокатных станов и пр.). Но уже в конце 90-х годов XIX в. практика наглядно убеждала в преимуществах одиночного привода, и к началу 20-х годов текущего столетия почти прекратились ранее многочисленные научно-технические дискуссии о достоинствах той или иной

системы. Решительную победу одержала система одиночного привода.

Последний вид привода освобождает промышленное предприятие от трансмиссий и, главное, позволяет работать каждому отдельному исполнительному механизму при переменных нагрузках и наивыгоднейших скоростях, а также позволяет ускорить процесс пуска в ход и изменение направления вращения. Одиночный привод оказал суще-

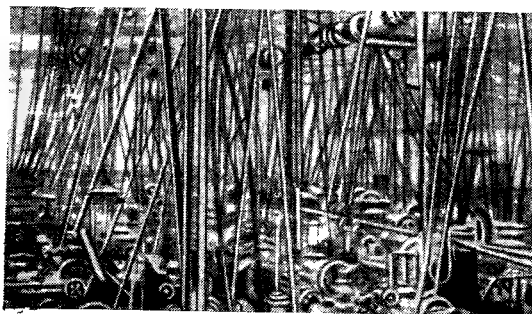


Рис. 8-24. Общий вид цеха с трансмиссионным приводом.

ственное влияние и на конструкцию самого исполнительного механизма. Сближение приводного двигателя с исполнительным механизмом иногда получалось настолько тесным, что конструктивно они представляли собой единое целое. Например, в случае электропривода ролик-ролика, служащий для перемещения металла, является наружным ротором асинхронного двигателя.

В настоящее время широкое развитие получает многодвигательный привод, в котором отдельная рабочая машина имеет уже не один, а много двигателей, каждый из которых приводит в движение одно из механических звеньев машины. Например, в приводе современного металлорежущего станка число двигателей может составлять несколько десятков.

Ряд примеров показывает насколько широкое распространение получил асинхронный двигатель для привода самых разнообразных исполнительных механизмов.

Асинхронный трехфазный двигатель еще в 90-х годах стал использоваться в качестве приводного двигателя в подъемных и мостовых кранах, где особенно ценным была допустимость кратковременных перегрузок асинхронного двигателя. На электрифицированных

элеваторах (в том числе на Новороссийском и Московском) асинхронные двигатели приводили в действие машины для очистки, ссыпки и транспортировки зерна.

Возможность устройства асинхронного двигателя с закрытым корпусом позволила найти для него ряд новых применений. Так, на пряжекрасильной фабрике в Мытищах электродвигатели приводили центрифуги, работавшие в сыром, насыщенном паром помещении при высокой температуре. На Бакинских нефтепромыслах широко применялся процесс добычи нефти, который назывался «гартание желонками» (подъем нефти из скважин с помощью высоких металлических сосудов — желонки). Для подъема желонки были использованы асинхронные двигатели, так как в таких двигателях нет никакого искрения, столь опасного в атмосфере, насыщенной легковоспламеняющимися парами.

На одном из меднопрокатных заводов асинхронный двигатель мощностью 500 л. с. был непосредственно соединен с прокатными валами. Асинхронные двигатели нашли широкое применение и на сахарных заводах: для привода центрифуг двигатель должен был развивать трех- и даже четырехкратный пусковой момент и, кроме того, удовлетворять высоким санитарным требованиям, предъявляющимся к сахарному производству.

К концу 90-х годов электротехнические заводы начали выпускать крупными сериями асинхронные двигатели небольшой мощности для ткацких и прядильных станков. Трехфазные асинхронные двигатели очень быстро стали проникать не только на механические, но и на цементные и кирпичные заводы, на бумажные фабрики, в портовые механизмы, в рудники и копи и т. п. Асинхронный двигатель становился основой промышленного электропривода.

Таким образом, с изобретением трехфазного асинхронного электродвигателя начался все ускоряющийся и усиливавшийся процесс реконструкции промышленности, процесс массовой электрификации.

Электрификация транспорта

В 70-х и особенно 80-х годах проводилось много работ по применению электричества для целей тяги. Рост городов потребовал усовершенствования средств городского общественного транспорта. Так называемые конно-железные дороги уже не удовлетворяли возросших потребностей городского населения, а применение парового городского транспорта, опробованное во многих городах («паровички»), оказалось неприемлемым вследствие дыма и копоти. Электрический городской транспорт все более становится предметом технической разработки и изучения. Реальная возможность для проведения опытов по электрификации транспорта появилась после изобретения генератора Грамма, тогда как с применением гальванических элементов (например, опыты Б. С. Якоби) электрическая тяга не имела заметных перспектив.

Применение генератора Грамма вносило существенные изменения в сам принцип электрической тяги. Во всех случаях, когда электрическая энергия для питания тягового

двигателя генерировалась гальванической батареей, техническое решение шло в направлении автономных устройств тяги, т. е. таких, в которых как генерирующая установка, так и электродвигатель были размещены на том самом экипаже или судне, которое должно было приводиться в движение. С того времени, как для выработки электроэнергии стали применять генераторы Грамма, приводимые в действие соответствующими паровыми агрегатами, система электрической автономной тяги перестала распространяться. Проблема электрической тяги могла найти свое удовлетворительное решение лишь при условии, если будут разработаны приемы экономичной передачи электроэнергии от места ее генерирования к движущемуся экипажу, вагону и т. п. Таким образом, электрическая тяга могла развиваться в виде неавтономной тяги с применением методов экономичной передачи электроэнергии на расстояние.

Система автономной электрической тяги, однако, не была полностью отвергнута; усовершенствование аккумуляторов позволило устраивать систему автономной тяги, пользуясь смонтированной в вагоне или на судне аккумуляторной батареей, током от которой питался электродвигатель. В начале XX в. получила развитие автономная, так называемая «теплоэлектрическая тяга».

В 1879 г. В. Сименсом была построена первая небольшая электрическая железная дорога на промышленной выставке в Берлине. Общий вид выставочной железной дороги Сименса представлен на рис. 8-25. Электрический ток по отдельному контактному рельсу передавался к двигателю небольшого вагона, напоминавшего собой современную аккумуляторную тележку (электрокар); обратным проводом служили рельсы, по которым двигался «локомотив». К последнему были прицеплены три миниатюрных вагончика, на которых могли разместиться 18 пассажиров.

Первые опыты неавтономной электрической тяги в России были произведены Ф. А. Пироцким (см. гл. 6). Еще в 1875—1876 гг. он использовал для передачи электроэнергии обычный железнодорожный рельсовый путь. Для того чтобы улучшить проводимость рельсового пути, им были применены стыковые электрические соединения, а для усиления изоляции друг от друга двух ниток рельсов одной колеи (они были изолированы через слой окислы и шпалы) — смазка подошвы рельсов асфальтом.

В августе 1880 г. Пироцкий осуществил пуск электрического трамвая на опытной линии в районе Рождествен-

ского парка конной железной дороги в Петербурге. Электроснабжение этой линии производилось от небольшой электростанции, построенной в парке, с генератором мощностью 4, а позднее 6 л. с. Под трамвайный электровагон был приспособлен двухъярусный вагон конной железной дороги (вес с пассажирами 6,5—7,0 т), к раме которого был подвешен электродвигатель, приводивший в движение ведущую ось через двухступенчатую зубчатую передачу. Схема питания электроэнергией трамвайной линии, пред-

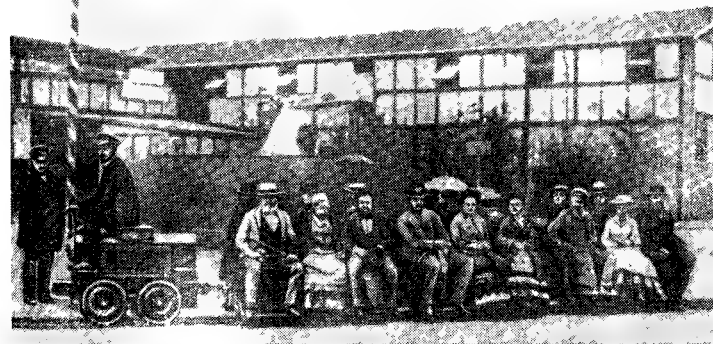


Рис. 8-25. Электрическая железная дорога В. Сименса (1879 г.).

ложенная Пироцким, некоторое время применялась для питания тяговой сети заграничных трамваев. Она была удобна благодаря своей простоте и давала возможность обойтись без третьего рельса, затруднявшего уличное движение или усложнявшего все сооружение. Очевидным недостатком такой схемы было наличие больших потерь электроэнергии от токов утечки в связи с плохой изоляцией рельсов.

После изобретения способа питания от верхнего контактного провода, сделанного в 1883 г. независимо Ван-Депулем (США) и В. Сименсом (Германия), схема питания по двум рельсам перестала применяться на электротранспорте, если не считать ее применения в настоящее время для автоблокировки. Заслугой Пироцкого является также

введение зубчатой передачи (вместо ременной) от вала двигателя к движущимся колесам. В 1889 г. подобный же передаточный механизм, получивший название «трамвайного привода», был применен Спрэггом в США.

Первоначальное техническое решение проблема электрического трамвая получила в 1881 г., когда была пущена в эксплуатацию линия трамвая Берлин — Лихтерфельде, начатая проектированием еще в конце 1879 г. С 1883 г. действовала линия трамвая в Португе (Ирландия) длиной 9,6 км; в 1884 г. были открыты для эксплуатации трамвайные линии в Брайтоне (Англия) длиной 1,5 км и во Франкфурте-на-Майне длиной 6,56 км. Первый трамвай в России — киевский — был пущен для общего пользования в 1892 г., причем решение о строительстве трамвайной линии было принято лишь после того, как убедились, что ни конная, ни паровая тяга неспособны преодолеть крутой подъем от Подола в Крещатику. Только трамвай соединил густонаселенную окраину Киева с центром города.

Некоторое внимание было в этот период уделено и электрическим лодкам; эти работы явились первыми после экспериментов Б. С. Якоби (1834—1839 гг.). Опыты по «электронавигации» были связаны с необходимостью разместить на самом судне как электродвигатель, так и источник питания — гальванические элементы и аккумуляторы. В 1881 г. на Парижской электрической выставке демонстрировалась электрическая лодка Г. Труве, вмещавшая 3 чел., передвигавшаяся против течения со скоростью 5,4 км/ч, а по течению со скоростью 9,0 км/ч. Лодка Труве имела в качестве источника энергии батареи гальванических элементов, и по существу Труве пришел к таким же результатам, как в свое время Якоби. В 1882 г. в Англии на Темзе была испытана лодка «Electricity», вмещавшая 12 пассажиров и оборудованная аккумуляторами; эта лодка развивала скорость 12,9 км/ч против течения и 14,5 км/ч по течению. Еще в большем масштабе были поставлены такого рода опыты в 1887 г. в Гавре (источник питания — батарея из 132 элементов, электродвигатель 3 кв). Все эти эксперименты не дали положительных результатов. Попытки применения электричества в авиации, которые предпринимал А. Н. Лодыгин в 1867 г., а в воздухоплавании, осуществленные бр. Тиссандье в 1883 г., были первыми шагами в этой новой области, но и они еще не привели тогда к выводам, интересным для практики.

На электрическом транспорте почти исключительное применение получил постоянный ток, который обеспечивал надежную работу тяговых электродвигателей и удобное регулирование их скорости. В связи с этим по мере развития техники переменного тока пришлось сооружать преобразовательные подстанции.

Наиболее естественным и поэтому первым по времени преобразователем переменного тока в постоянный была двигатель-генераторная установка. В 1885—1889 гг. создаются первые одноякорные преобразователи однофазного и трехфазного переменных токов в постоянный, которые в каждом случае представляли собой комбинацию синхрон-

ного электродвигателя и генератора постоянного тока с общим якорем. Одноякорный преобразователь обладал рядом существенных преимуществ перед двигатель-генераторной установкой: снижение на 30—40% веса, значительная экономия места (до 50%), очень высокий к. п. д. Одноякорные преобразователи в 90-х годах прошлого и начале настоящего столетия получили очень широкое распространение, особенно в тяговых установках, однако позднее, уже в 20-х годах, они начали вытесняться новым мощным средством преобразовательной техники — статическими ионными преобразователями.

Централизованное производство электроэнергии позволило в широких масштабах приступить к электрификации городского и пригородного транспорта; расширяется электрификация заводских и рудничных железных дорог. Однако очень скоро стало ясно, что трамвайный транспорт не может полностью удовлетворить потребность в быстром перемещении огромных масс людей в крупнейших центрах капиталистической промышленности. Значительно увеличить скорость и удобство пассажирских перевозок удалось путем сооружения метрополитенов (надземных и подземных железных дорог).

В 1893 г. была предпринята постройка большой надземной электрической железной дороги в Берлине, которая проектировалась В. Сименсом еще в 1879 г. Рельсы этой железной дороги были уложены по эстакаде, протянувшейся вдоль широких улиц. На рис. 8-26 изображена другая надземная железная дорога, которая соединяла почти непрерывную цепь промышленных городов от Эльберфельда до Бармена (Германия). Эта дорога отличалась от берлинской тем, что рельсы, по которым двигался вагон, находились не под вагоном, а над ним, т. е. вагон «подвешивался» на двух или четырех колесах. Вся дорога проведена над руслом небольшой реки Вуппер, что дало возможность строившей дорогу фирме избежать покупки дорогой земли.

Более удачной с точки зрения внешнего вида улиц, увеличения пропускной способности и уменьшения шума и пр. оказалась подземная дорога. Подземные дороги с паровой тягой строились еще до 90-х годов прошлого века (например, метрополитен в Лондоне, который был переведен на электрическую тягу в 1890 г.). Одной из первых подземных железных дорог, которая сразу строилась как электрическая дорога, явился метрополитен в Будапеште (1896 г.). Сооружение этого метрополитена велось открытым способом: вдоль улицы вырыли глубокую канаву, бетонировали ее дно и стенки, а затем закрывали сверху железными балками и, соорудив заново мостовую, восстанавливали прежний вид улицы.

Впоследствии для метрополитена стали строить туннели глубокого залегания под землей.

Вслед за первыми опытами электрификации городского транспорта уже в 90-х годах прошлого века делались по-

пытки перевести на электротягу сначала пригородные, а затем и магистральные железные дороги с большой плотностью движения. Перспектива перевода на электротягу пригородных и магистральных железных дорог была весьма заманчивой: электрический транспорт дает возможность равномерно распределять мощность двигателей по длине поезда (так называемые мотор-вагонные секции), что позволяло увеличить общий вес поездов, а также скорость, даже при коротких длинах перегонов.

Развитие автономного электротранспорта нашло свое продолжение в появлении теплоэлектрической тяги. Этот вид транспорта, на котором сохраняются все преимущества электрической тяги при первичном тепловом двигателе (дизель), открывал чрезвычайно большие возможности. Тепловоз, например, является гораздо более экономичным и более автономным локомотивом, чем паровоз. Теплоэлектрическая тяга к середине текущего столетия приобретает все большее значение и в настоящее время начинает вытеснять паровую тягу. Впервые теплоэлектрическая тяга была осуществлена в 1903—1904 гг. для привода нефтеналивных барж «Вандал» и «Сармат», построенных Сормовским заводом.

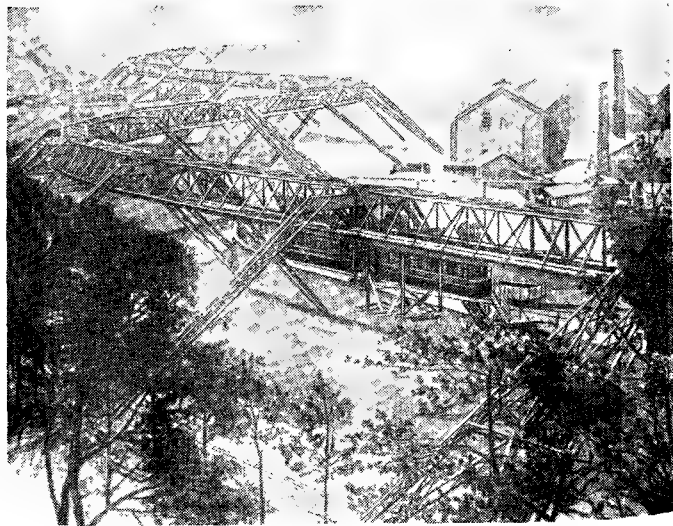


Рис. 8-26. Надземная электрическая дорога Эльберфельд—Бармен (ныне г. Вупперталь).

В России до Великой Октябрьской социалистической революции электрификация железных дорог не получила развития, несмотря на многочисленные проекты и выступления передовых русских деятелей, предлагавших электрифицировать важнейшие участки железных дорог. Даже начавшаяся электрификация дороги Петербург—Ораниенбаум не была завершена из-за первой мировой войны. Остались нереализованными несколько проектов сооружения электрифицированных железных дорог на Кавказе и в том числе электрификации участка Закавказской железной дороги на Сурамском перевале (последний проект был осуществлен после Великой Октябрьской социалистической революции). Теплоэлектрическая тяга в дореволюционной России практически не получила никакого распространения.

Единственной областью применения электрической тяги в России был трамвай. С 1892 по 1900 г. трамвайное движение было открыто в 12 городах России; всего до революции в России действовали 36 трамвайных предприятий в 35 городах. Сравнительно быстрое для дореволюционной России развитие трамвая объясняется значительно ускорившимся в конце XIX и начале XX вв. ростом городского населения, связанным с быстрым развитием капиталистического производства. Так, с 1840 по 1915 г. городское население в России увеличилось почти в 5 раз.

Зарождение промышленной электрохимии и электротермии

Громадное значение в развитии производительных сил сыграли новые отрасли промышленного производства, появление которых обуславливалось

применением электрической энергии. Речь идет о тех отраслях производства, где электрическая энергия играет роль основного технологического фактора. Это—промышленная электрохимия и электротермия.

Промышленная электрохимия зародилась вместе с гальванотехническими мастерскими и предприятиями по производству электролитическим путем кислорода и водорода. Разработка технологии получения электролитической меди сыграла большую роль в развитии кабельной техники. В широких масштабах в конце XIX в. осуществлялось электрохимическое производство бертолетовой соли, хлора и щелочей.

Особенно большие надежды возлагались на электро-технологические процессы. Чтобы представить себе значение возникновения электротермии в конце прошлого века, достаточно напомнить, что алюминий благодаря электро-технологии перестал быть драгоценным металлом. Уже в 1898 г. работало восемь заводов по производству алюминия, в том числе крупнейшие заводы у Ниагарского и Рейнского водопадов, дававших дешевую энергию. Вслед за металлургией алюминия начинает развиваться ряд других электротермических производств. В конце прошлого века был найден способ получения карборунда. Тогда же был

разработан метод получения карбида кальция, который стал потребляться в больших количествах для выработки ацетилена. Позднее были изобретены и усовершенствованы различные конструкции электрических печей для электрометаллургии. Возникла новая отрасль металлургии — производство высококачественных сталей.

Важной областью применения электрической энергии явилась электрическая сварка. Еще в конце 60-х годов были проведены опыты использования электрического тока для целей сварки металлов. На Парижской выставке 1867 г. американский электротехник И. Томсон демонстрировал

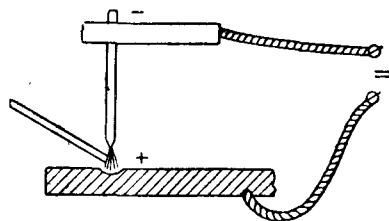


Рис. 8-27. Схема дуговой электро-сварки по способу Н. Н. Бенардоса.

способ контактной сварки, пропуская электрический ток через два металлических предмета, плотно друг к другу приложенных и имевших соприкосновение в большем или меньшем числе отдельных мест или точек; в этих местах сопротивление было настолько большим, что металл накаливался и размягчался, что приводило к свариванию

обоих кусков. Однако этот метод не получил практического распространения вследствие своего несовершенства.

Другим направлением в области электросварки явилось использование тепла электрической дуги. Первое решение этой проблемы принадлежит русскому изобретателю Н. Н. Бенардосу, положившему начало технике дуговой электросварки, которая нашла затем широкое применение в технологии. В 1886 г. Бенардос оформил свое изобретение русской привилегией, и его метод дуговой электросварки под названием «электрогефест» вошел в практику. Сущность этого метода заключается в том, что один полюс источника энергии соединяется с угольным либо графитовым электродом, а другой — со свариваемым металлом (рис. 8-27). В зону электрической дуги вводится металлический стержень, который расплавляется, застывает и сваривает предметы. Бенардос ввел различные усовершенствования в свой метод, в частности он указывал, что вместо угольного электрода можно использовать другие проводники, в том числе и металлы.

Иной способ сварки металлов был предложен Н. Г. Сла-

вяновым, который получил в 1891 г. привилегии на так называемую электрическую отливку металлов и электрическое уплотнение металлических отливок, в основу которых, как и в основу метода Бенардоса, было положено явление электрической дуги.

Сущность изобретения Славянова (рис. 8-28) заключается в том, что с одним полюсом источника электрического тока соединяется свариваемое металлическое изделие, а с другим — металлический стержень, закрепленный в «пла-

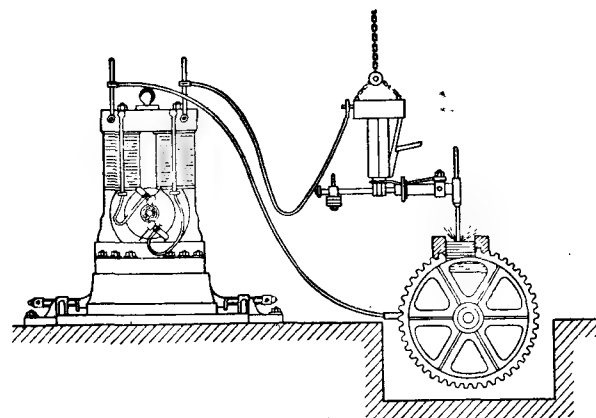


Рис. 8-28. Схема дуговой электросварки по способу Н. Г. Славянова.

вильнике». Электрическая дуга, появляющаяся между металлическим стержнем и свариваемым предметом, расплавляет металл, и поверхность обрабатываемого предмета соединяется (сливается) с наливаемым металлом, образуя после застывания прочное соединение.

Н. Г. Славянов впервые создал полуавтомат для металлического электрода — «плавильник», которым обеспечивалось регулирование длины дуги. Этот «плавильник» является фактически предшественником современных автоматических сварочных установок. Н. Г. Славяновым была также предусмотрена шлаковая защита расплавленного металла от воздействия окружающей среды; им применялись присадки различных ферросплавов.

В короткий срок способы «электрогефест» и «электрическая отливка металлов» получили широкое применение в России и в особенности на заводах Германии, Франции и Англии.

В этот же период начинает развиваться электрометаллургия. Путем комбинирования различных химических реакций с методами электролиза было освоено промышленное производство меди, алюминия, цинка. Опыты по применению электрических дуговых печей для плавки руд, металлов и других веществ начались еще в конце 40-х годов, но лишь в 1878 г. В. Сименсу удалось придать такую конструкцию дуговой печи, что она могла использоваться на производстве, в частности для восстановления металлов из руд.

Отдельное направление в области электронагрева составило применение токов высокой частоты для выделения тепла непосредственно в обрабатываемом материале. По мере роста производства электроэнергии и ее удешевления электротермические процессы стали находить все большее применение на практике.

Постепенно электрификация захватывала все новые отрасли производства, проникала в сельское хозяйство, быт, медицину. Этот процесс углублялся и расширялся, электрификация принимала массовый характер. Начинался современный этап развития энергетической техники.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ВОЗНИКНОВЕНИЕ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

9-1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРЕДПОСЫЛОК ДЛЯ СОЗДАНИЯ БЕСПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

Период начавшегося упадка капитализма и его перерастания в империализм характеризуется монополистической концентрацией производства, захватом новых рынков и вывозом капитала. Чрезвычайно расширившаяся торговля с заморскими странами и большой рост торгового и военно-морского флотов крупнейших капиталистических держав предъявили новые требования к средствам связи, заключавшиеся главным образом в необходимости создания постоянной связи между подвижными объектами, например кораблями, находящимися на значительных расстояниях друг от друга или вдали от берегов.

Отсутствие необходимых средств сношения являлось одним из существенных препятствий к развитию мореплавания, морской торговли и повышению надежности пасса-

жирского дальнего морского транспорта. По мере роста числа кораблей и увеличения их быстроходности проблема связи в условиях военно-морского флота приобретала все более важное значение. Проводная электрическая связь, несмотря на свойственные ей крупные достоинства, переставала на новом этапе удовлетворять также и тем особым требованиям, которые к ней стала предъявлять колониальная завоевательная политика крупнейших капиталистических стран. Колониальные владения оказались расположенными не только по побережьям, но и в глубинах таких материков, как, например, африканский. Установление проводной связи с колониальными владениями, расположенными в глубине континентов, оказалось в большинстве случаев трудно осуществимым. Все эти обстоятельства явились вполне закономерной причиной усиления интереса к разработке новых и более совершенных средств дальней связи.

В первой половине прошлого столетия, когда еще только начиналось распространение электромагнитных телеграфов, были поставлены простейшие опыты беспроволочной электрической связи; во второй половине XIX в. число подобных экспериментов заметно возросло. Научные открытия 80—90-х годов в области электромагнитных волн создали предпосылки для решения проблемы беспроволочной связи. Изобретение радио явилось одним из выдающихся достижений человеческой культуры. Длинный ряд исследований ученых и инженеров, работавших в разных странах и подготовивших почву для изобретения беспроволочной связи, еще раз убедительно подтверждает известное положение Маркса о том, что всякое значительное открытие или изобретение является результатом коллективного труда, заключающегося частично в кооперировании усилий современников, частично в использовании труда предшественников.

Развитие беспроволочной электрической связи в историческом разрезе может быть разделено на следующие этапы:

I этап — предыстория радио — охватывает время от начала первых опытов по передаче сигналов без проводов посредством электричества (конец 30-х годов прошлого века) и до 1895 г., когда А. С. Поповым был создан первый радиоприемник. В начале этого этапа, примерно до конца 80-х годов, велось изучение свойств электромагнитных волн, разрабатывались методы их генерирования и приемы их

обнаружения в пространстве. С 1887 г., когда Г. Герц опубликовал результаты своих исследований, началось более интенсивное изучение электромагнитных волн; возможность их использования для создания беспроводного телеграфа становится все более ясной.

II этап—«доламповый» период развития радио (1895—1918 гг.); он охватывает время от изобретения радио до начала применения электронных ламп в радиотехнике.

III этап (1918—1940 гг.) характеризуется возникновением радиоэлектроники, интенсивным развитием радиотехники на основе широкого и разнообразного применения электронных приборов.

IV этап (с 1940 г. по настоящее время)—современный этап развития радиоэлектроники.

Каждому из этих этапов свойственны свои особенности, которые ниже и будут кратко охарактеризованы.

9-2. ОПЫТЫ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ НА РАССТОЯНИЕ БЕЗ ПРОВОДОВ (ДО СЕРЕДИНЫ 80-х ГОДОВ XIX в.)

В течение 30—50-х годов прошлого века был предпринят ряд попыток передачи сигналов на расстояние без проводов и было выдано несколько патентов на такого рода изобретения. В одних случаях было использовано электростатическое воздействие заряженных тел друг на друга, в других—индуктивная связь двух электрических цепей. В некоторых схемах для передачи сигнала на расстояние без проводов было осуществлено взаимодействие токов (или токов и магнитов), выражающееся в отклонении стрелки в приемнике под влиянием тока в передатчике. Для этой цели были опробованы также токи в земле, возникающие между двумя заземленными электродами. Всем этим устройствам был свойствен общий недостаток: воздействия передатчика на приемник быстро убывали при увеличении расстояния между ними. В некоторых отдельных случаях установки этого рода находили практическое применение, особенно для сигнализации с одного берега широкой реки на другой.

Среди самых ранних опытов по передаче электрических действий на расстояние без проводов следует отметить опыты проф. Дж. Генри, описанные в 1850 г. в собрании его трудов, изданных Смитсоновским институтом в Вашингтоне. Эти опыты заключались в том, что стальная игла, помещенная внутри катушки из медных проводов, намагничивалась возникавшим в этой катушке вторичным

током при действии разряда электрической машины на другую первичную катушку, находившуюся на расстоянии 220 ф. тов (~78 м) от первой. В этих опытах современники могли лишь видеть своеобразный случай индукции, ибо о существовании электромагнитных волн в то время еще не было представления.

Работами Дж. Генри (1842 г.) и Г. Л. Гельмгольца (1847 г.) было установлено, что искровой разряд имеет ко-

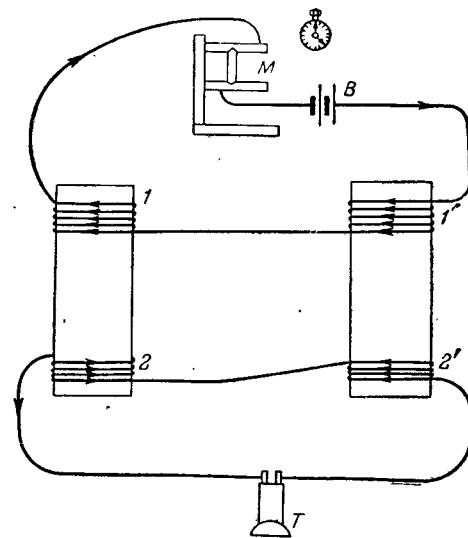


Рис. 9-1. Схема индукционных весов Юза.

лебательный характер. На основе этого явления Д. Юз в 1879 г. при своих опытах над индукционными весами фактически уже наблюдал распространение электрических волн и обнаруживал их, но, не сумев найти объяснения замеченному явлению, прекратил эксперименты. Опыты Юза, сведения о которых появились в печати спустя 20 лет, когда было уже изобретено радио, заключались в следующем. По заданию монетного двора Юз построил электрический прибор для контроля содержания драгоценного металла в монетных сплавах. Этот прибор был назван индукционными весами (рис. 9-1). На двух эбонитовых цилиндрах в верхней и нижней частях наматывались катушки 1 и 2, 1' и 2', каждая из которых состояла из 100 м изолированной мед-

ной проволоки, уложенной в канавки с ребордами. Обе верхние катушки образуют последовательную цепь, в которую включаются также микрофон *М* (с часами — источником ритмичных звуковых колебаний) и источник питания *В*. Обе нижние катушки тоже соединены последовательно в цепь, в которую включен телефон *Т*. Нижние катушки имели противоположные направления намотки, и поэтому возникавшие в каждой из них э. д. с. индукции имели различные направления. В один из эбонитовых цилиндров вводилась монета эталонного типа со стандартным содержанием драгоценного металла и лигатуры; если во второй цилиндр вводилась испытываемая монета, удовлетворявшая требованиям стандарта, то в телефонной трубке не было звучания. Но если во второй цилиндр помещалась нестандартная монета, то в телефонной трубке слышались потрескивания. Однажды Юз обнаружил, что подобные звучания возникали и при нахождении внутри цилиндров стандартных монет. Причину этого Юз усмотрел в том, что одна из верхних катушек имела поврежденную изоляцию на небольшом участке проволоки, вследствие чего при пропускании тока через эту катушку происходило искрение; появление искр всякий раз сопровождалось треском в телефоне *Т*. Отрезав нижние части обоих цилиндров с катушками 2 и 2' и удалив их на некоторое расстояние от верхних частей цилиндров с катушками 1 и 1', Юз также обнаружил звучание в телефоне. И в данном случае при искрении, несомненно, генерировались электромагнитные волны, обнаруживаемые телефонной трубкой. Юз продемонстрировал свои опыты перед группой видных английских ученых, но они отвергли соображения Юза о действии электрических волн и признали, что здесь имеет место «индукция особого рода». В результате этого Юз ничего о своих наблюдениях не опубликовал.

В 1882 г. в США был выдан патент Дольбиру на беспроволочный телеграф, в схеме которого были передающая и приемная антенны. Телеграф был основан на использовании флуктуаций человеческого голоса в микрофоне передающего устройства, воспринимаемых в цепи приемника.

В 1885 г. Т. А. Эдисоном и Гиллилендом был запатентован беспроволочный телеграф, предназначенный для передачи сигналов с неподвижной передающей станции, расположенной в непосредственной близости от железнодорожного полотна и телеграфной линии, к приемному аппарату, находящемуся в вагоне движущегося поезда. Этот телеграф

действовал на принципе электростатической индукции. Он был установлен на линии Чикаго — Мильвоки — Сен-Поль и работал вполне удовлетворительно. Вначале эта система вызвала значительный интерес, но вскоре выяснилось, что особой необходимости в поддержании связи между движущимся поездом и неподвижной станцией нет, и установка была демонтирована.

Более подробное рассмотрение описанных выше систем и некоторых других показывает, что задача беспроволочной передачи сигналов на расстояние посредством электричества ставилась со всей определенностью, но она могла получить только отдельные частные решения, которые имели очень ограниченное применение.

9-3. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Новый этап в развитии исследований в области беспроволочной связи начался после опубликования труда Д. К. Максвелла «Трактат об электричестве в магнетизме» (1873 г.), в котором теоретически доказывались существование электромагнитных волн и их свободное распространение в пространстве с конечной скоростью. Теория Максвелла не могла не привлечь внимания многих ученых, занявшихся ее изучением и стремившихся найти пути ее практического применения.

Наиболее убедительные экспериментальные доказательства справедливости теории Максвелла были даны в 1886—1889 гг. Г. Герцем, получившим электромагнитные волны и показавшим, что они подобно свету обладают свойствами отражения, преломления, интерференции, дифракции и распространяются в пространстве со скоростью света.

Для возбуждения электрических волн Герц применил прибор, названный им вибратором, а для обнаружения волн — другой прибор — резонатор (рис. 9-2). Вибратор Герца представлял собой колебательный контур, состоявший из двух стержней одинаковой длины, которые присоединялись к зажимам вторичной обмотки индукционной катушки; на обращенных друг к другу концах стержней укреплялись небольшие металлические шары. К противоположным концам стержней можно было прикреплять металлические листы разных размеров для изменения емкости колебательного контура. При прохождении индуктированного тока через вторичную обмотку катушки между шара-

ми проскакивала искра и излучались электромагнитные волны. Резонатор Герца состоял из согнутой в кольцо проволоки, на обоих концах которой укреплялись металлические шарики; он служил индикатором прохождения электромагнитной волны. При соответствующем подборе размеров кольца и промежутка между шариками резонатора этот прибор можно было настроить в резонанс с вибратором; тогда при разряде в вибраторе наблюдалось проскакивание искры также и между шариками резонатора. Резонатор Герца был прибором очень малой чувствительности и поэтому мог служить индикатором электромагнитных волн в пределах комнаты на небольших расстояниях от вибратора. Герц пользовался волнами длиной 60 см—6 м.

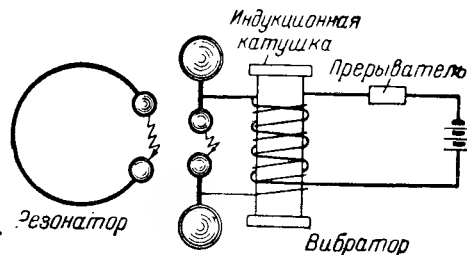


Рис. 9-2. Вибратор и резонатор Г. Герца.

Обнаруженные Герцем электромагнитные волны современниками были названы «лучами Герца». Таким образом, свое название радио получило в конечном счете от латинского слова *radius*, означающего «луч». Г. Герц был первым человеком, который сознательно управлял электромагнитными волнами и доказал идентичность их свойств со свойствами света. Однако он не ставил себе задачи создания средства беспроволочной связи и не выходил (и не мог выйти) при своих экспериментах за пределы лабораторной комнаты.

Опыты Герца привлекли внимание ученых всего мира. В физических кабинетах и лабораториях многих стран стали воспроизводиться его классические эксперименты и исследоваться электромагнитные волны. Поскольку резонатор Герца был недостаточно чувствительным, нужно было создать более совершенный индикатор электромагнитных волн; несомненно, важным было применение и возможно более мощного вибратора. Эти задачи получили наиболее существенное для практики решение в трудах

английского физика О. Лоджа и русского ученого А. С. Попова.

Лодж при воспроизведении опытов Герца использовал в качестве индикатора электромагнитных волн прибор, описанный в 1891 г. французским физиком Эдуардом Бранли. Этот прибор состоял из стеклянной трубки, наполненной металлическими опилками, которые под действием электрических волн слипаются, отчего их сопротивление резко уменьшается (рис. 9-3). Такую трубку, снабженную концевыми трубчатыми электродами, Лодж назвал «когерером» (от латинского глагола *cohaerere* — сцепляться, связываться). Используя когерер, Лодж несколько увеличил дальность приема электромагнитных волн, но и в этом случае не выходил за пределы нескольких комнат своей лаборатории. Для восстановления чувствительности когерера после прохождения электромагнитной волны его нужно было встряхивать; для

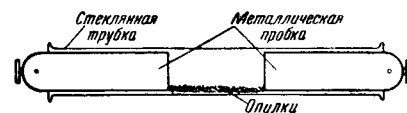


Рис. 9-3. Чувствительная трубка (когерер) Бранли.

этих целей Лодж установил непрерывно действовавший часового механизма. Несмотря на то, что Лоджу удалось несколько увеличить расстояние между передатчиком и приемником электромагнитных волн, он не пытался разработать устройство для электрической беспроволочной связи.

С начала 90-х годов прошлого века большое внимание вопросу электрических волн и высокочастотной техники уделял Никола Тесла. Он построил электрические генераторы на частоты 5—20 кГц, а также трансформатор высокой частоты («трансформатор Тесла», 1891 г.); в своей нью-йоркской лаборатории Н. Тесла тогда же начал изучать проблему передачи сигналов и энергии на расстояние без проводов.

Впервые мысль о возможности применения электромагнитных волн для передачи сигналов на расстояние четко изложил А. С. Попов еще в 1889 г. в заключительной части своего доклада на тему «Новейшие исследования о соотношении между световыми и электрическими явлениями». Попов сказал: «Человеческий организм еще не имеет такого органа чувств, который замечал бы электромагнитные волны в эфире; если бы изобрести такой прибор, который заменил бы нам электромагнитные чувства, то его можно было бы применять также к передаче сигналов на расстоя-

ние». Несколько позднее, в 1892 г., аналогичное высказывание сделал английский ученый У. Крукс, который сам изучением электромагнитных волн не занимался. В своей научно-популярной статье он писал: «Лучи света не проходят через стены или, как мы это отлично знаем, через лондонский туман, но электромагнитные волны длиной в ярд или более легко проходят через такую среду, являющуюся для них прозрачной. Здесь открывается изумительная возможность телеграфирования без проводов, столбов, кабеля и других наших теперешних дорогостоящих предметов. При реализации некоторых разумных предположений все это оказывается в пределах реального осуществления».

Такое реальное осуществление было впервые произведено Александром Степановичем Поповым в 1895 г.

9-4. ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО

А. С. Попов, изучив трубки Бранли и Лоджа, принялся за разработку еще более чувствительного когерера. Он исследовал свойства порошков различных металлов. Стремясь улучшить контакт между порошком и электродами, он построил трубки разных форм и с различными расположениями электродов. Это привело к созданию безотказно дей-



Рис. 9-4. Когерер А. С. Попова (электроды АВ и CD из тонкой листовой платины).

ствующего индикатора электромагнитных волн с постоянной чувствительностью; в качестве порошка служили стальные или железные опилки (рис. 9-4).

Следующей проблемой являлось усовершенствование процесса встряхивания опилок после их слипания, вызванного прохождением электромагнитной волны. Часовой механизм, применявшийся Лоджем для восстановления чувствительности когерера, не обеспечивал надежности действия схемы: такое встряхивание было беспорядочным и могло приводить к пропуску сигналов. А. С. Попов искал

автоматический метод, который позволял бы восстанавливать чувствительность когерера после каждого сигнала. В результате многочисленных экспериментов Попов предложил метод периодического встряхивания когерера с помощью молоточка электрического звонка и применил электромагнитное реле для включения цепи этого звонка. Схема, разработанная А. С. Поповым, обладала большей чувствительностью, и уже в 1894 г. ему удалось с ее помощью принимать сигналы на расстоянии нескольких десятков метров.

Во время этих опытов А. С. Попов обратил внимание на то, что дальность действия приемника заметно увеличивается при присоединении к когереру вертикального провода. Это была приемная антенна, использованием которой А. С. Попов внес существенные улучшения в условия работы приемника. Исследования А. С. Попова привели его к созданию прибора для обнаружения электромагнитных волн, представлявшего собой первый радиоприемник (рис. 9-5). Этот прибор был устроен следующим образом. Чувствительная трубка с металлическими опилками (когерер) укреплялась в горизонтальном положении; к одному

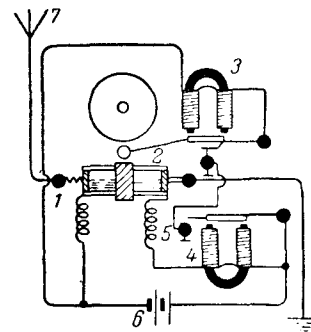


Рис. 9-5. Схема радиоприемного устройства А. С. Попова (1895 г.). 1 — зажимы, между которыми укрепляется когерер 2; 3 — звонок; 4 — электромагнитное реле; 5 — контакт, замыкающий цепь батареи — звонок; 6 — батарея; 7 — антенна.

соединялся отрезок проволоки, представлявший собой приемную антенну, а к другому заземляющий провод. Электрическая цепь батареи замыкалась через когерер и электромагнитное реле: вследствие большого сопротивления опилок в трубке (до 100 000 ом) ток в цепи батареи был недостаточен для притяжения якоря реле. Как только трубка подвергалась действию электромагнитной волны, опилки слипались, сопротивление трубки значительно уменьшалось, ток в цепи возрастал и якорь реле притягивался. При этом происходило замыкание второй цепи, и ток направлялся через обмотку звонкового реле, в результате чего звонок приходил в действие. Молоточек звонка при возвращении в исходное положение ударял по трубке, и она поэтому вновь становилась чувствительной к элек-

ромагнитным волнам. Защита трубки от действия искр, возникавших в контактах реле, осуществлялась посредством подключения двух катушек самоиндукции или помещением трубки между обмотками реле.

7 мая 1895 г. А. С. Попов демонстрировал работу радиоприемника во время своего доклада на заседании Физического отделения Русского физико-химического общества. Этот день — 7 мая 1895 г. — считается в СССР датой изобретения радио. Статья А. С. Попова с описанием конструкции приемника была опубликована в журнале Русского физико-химического общества в январе 1896 г.

Обнаружив, что приемник реагирует на грозовые разряды, Попов создал второй прибор — «грозоотметчик», снабженный специальным пишущим аппаратом, регистрирующим сигналы на ленте. В 1895—1896 гг. грозоотметчики Попова уже получили практическое применение. Один грозоотметчик был установлен в Нижнем-Новгороде на электростанции для предупреждения о приближении грозы; второй наряду с другими метеорологическими приборами — в Петербургском лесном институте.

В сентябре 1895 г. А. С. Попов к схеме присоединил аппарат Морзе и ввел запись на ленту; так был создан приемник с записью сигналов по азбуке Морзе.

В марте 1896 г. на заседании Русского физико-химического общества он демонстрировал первую в мире радиотелеграфную передачу на расстояние 250 м, а в 1897 г. осуществил радиосвязь между несколькими кораблями Балтийского флота на расстоянии до 5 км.

В течение нескольких лет А. С. Попов и его сотрудники (П. Н. Рыбкин, Д. Н. Троицкий) продолжали работать над совершенствованием радиоприемника. В 1899 г. они установили возможность приема радиосигналов на слух с помощью телефона, включенного последовательно с когерером; это сразу увеличило дальность радиосвязи.

В 1897 г. Поповым было обнаружено влияние на радиосвязь между двумя кораблями третьего судна, проходящего между этими кораблями и пересекающего направление связи. Он указывал, что происходящее при этом явление отражения радиоволн может быть использовано для обнаружения морских судов. Как известно, явления, наблюдавшиеся и правильно объясненные А. С. Поповым, лежат в основе радиолокации.

Преимущества беспроводной радиосвязи были наглядно продемонстрированы в конце 1899 г. в связи с аварией

броненосца «Генерал-адмирал Апраксин», севшего на камни у о. Гогланд. Необходимо было в короткий срок наладить связь с кораблем, удаленным на 43 км от ближайшего бережного пункта Котки, где имелась телеграфная станция. Несмотря на большие трудности, А. С. Попов вместе с П. Н. Рыбкиным устроили радиостанции на Гогланде и Котке и обеспечили между ними надежную связь. Таким образом, была осуществлена радиосвязь на относительно большом расстоянии и при этом не в целях эксперимента, а для практических нужд.

В развитии радиопромышленности и организации линий дальней радиосвязи большую роль сыграл итальянец Г. Маркони. В июне 1896 г. он получил в Англии патент на «способ передачи электрических импульсов и сигналов и аппарат для этого». Однако устройство аппарата долгое время в печати не описывалось. Когда же в июне 1897 г. было опубликовано устройство приемной схемы Маркони, стало очевидным, что она совершенно идентична со схемой приемника Попова.

Приемник Маркони (рис. 9-6) состоял из когерера, в котором между двумя полюсными серебряными накопечниками находился порошок из серебряных и никелевых опилок, смешанных с небольшим количеством ртути. Воздух из трубки был выкачан. К когереру были прикреплены два металлических листа, позволившие настраивать приемник на определенную длину волны, излучаемую передатчиком, путем изменения емкости устройства. Катушки самоиндукции ослабляли влияние на когерер искр, возникавших в контактных реле, а также препятствовали утечке принимаемой энергии. Последовательно с когерером включалось телеграфное реле, которое после воздействия электромагнитной волны на когерер замыкало цепь другой батареи. При этом приходил в движение молоточек реле, восстанавливавший чувствительность когерера и производивший при ударах по стеклу трубки звуки, которые соответствовали знакам азбуки Морзе. Принимаемые сигналы можно бы-

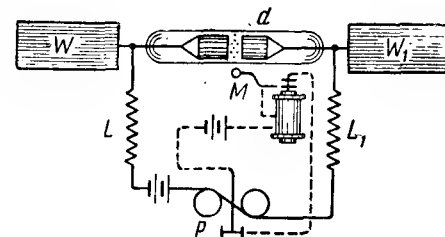


Рис. 9-6. Схема радиоприемника Г. Маркони.

P — телеграфное реле; d — когерер; W и W₁ — металлические листы; M — молоточек реле второй цепи; L и L₁ — катушки индуктивности.

ло также записывать на ленту посредством аппарата Морзе, присоединенного к схеме (на рисунке не показан). В качестве передатчика Маркони использовал вибратор Герца, усовершенствованный итальянским профессором А. Риги; этот вибратор позволял получать волны сравнительно малой длины (около 1,2 м). К передатчику и приемнику присоединялись антенны и заземление, что обеспечивало радиосвязь на значительных расстояниях. С помощью описанной схемы летом 1897 г. Маркони осуществил радиосвязь на расстоянии 9 миль.

А. С. Попов оценивая приемник Маркони, писал в петербургской газете «Новое время»: «В июне (1897 г.— Авт.) были опубликованы Присом новые результаты опытов Маркони и подробности приборов. При этом оказалось, что приемник Маркони по своим составным частям одинаков с моим прибором, построенным в 1885 г.». Вместе с тем в ряде своих выступлений Попов отмечал, что чувствительность прибора Маркони несколько больше, и видел отличие его опытов в том, что Маркони использовал явление резонанса.

Как видно из схемы Маркони, а также из ряда материалов о его деятельности, он настойчиво стремился добиться увеличения дальности связи. В 1889 г. ему удалось осуществить радиосвязь между Англией и Францией, а в 1901 г., построив мощный передатчик (около 15 кВт) и сложную антенну, он передал радиосигналы через Атлантический океан.

Условия работы Маркони и Попова были совершенно различными. В то время как Маркони, поддерживаемый крупными английскими промышленниками, располагал громадным капиталом и имел в своем распоряжении большое число высококвалифицированных сотрудников и все условия для развития работ, А. С. Попов был стеснен в средствах для проведения экспериментов и только в 1902 г. организовал в Кронштадте мастерскую с очень небольшим по масштабу производством радиостанций. Отсталая промышленность дореволюционной России не была в состоянии развернуть значительного производства радиоаппаратуры, и поэтому отечественная радиопромышленность с самого начала оказалась под сильным влиянием иностранного капитала.

9-5. РАЗВИТИЕ РАДИОТЕХНИКИ В ПЕРИОД 1895—1918 гг.

Радиопередающие устройства

История радио на втором этапе развития характеризуется чрезвычайно бурным ростом и непрерывным рядом поистине революционных усовершенствований, которые коренным образом меняли техническую сущность и расширяли области применения радио. По мере развития радиотехники шло изучение электрических волн в новых диапазонах частот. Вначале применялись только сильно затухающие колебания, от которых перешли к колебаниям слабо затухающим и, наконец, к незатухающим.

В период применения затухающих колебаний передатчики имели довольно простую конструкцию, прототипом которой был вибратор Герца. Присоединение высоко поднятой антенны к одному из полувибраторов, а заземляющего провода — ко второму получило широкое распространение. С увеличением размеров и числа проводов антенны возрастала ее емкость, в результате чего увеличивались как энергия, так и длина излучаемой волны (в это время поэтому пользовались только длинными волнами), но наличие разрядника в цепи антенны приводило к значительным потерям энергии и сильному затуханию колебаний. В 1899 г. было предложено (Ф. Браун) вынести искровой разрядник из антенной цепи передатчика с тем, чтобы добиться уменьшения затухания в этой цепи. Установки, работавшие на сильно затухающих колебаниях, обладали сравнительно небольшой дальностью действия, имели малую помехоустойчивость и слабую избирательность. Это заставило обратиться к слабо затухающим колебаниям.

Искровые передатчики могли удовлетворительно передавать простые телеграфные сигналы, различавшиеся только своей длительностью (например, по азбуке Морзе). Принципы радиотелефонии, т. е. приема сигналов на слух, были известны по опытам А. С. Попова и П. Н. Рыбкина (1899 г.); передача речи и музыки чрезвычайно увеличила бы практическое значение беспроводной связи, но отдельные послышки волн при затухающих колебаниях, чередующиеся с периодами отсутствия волн, нельзя было применить для передачи звуковых частот. Эти обстоятельства привели к разработке устройств для генерирования незатухающих колебаний, т. е. непрерывного потока энергии, который можно было бы плавно модулировать.

Первыми передатчиками незатухающих колебаний были дуговые. Еще в 1892 г. Э. Томсон (США) установил, что

в контуре, присоединенном параллельно к дуге, возникающей между двумя металлическими электродами, образуются незатухающие колебания. Впервые дуговой передатчик для целей радиосвязи был применен датским инженером В. Поульсеном (1903 г.). Дуговые генераторы давали длинноволновые (более 200 м) колебания с недостаточно стабильными амплитудой и периодом; применение дуговых передатчиков для радиотелефонии было весьма затруднено, но в радиотелеграфии для международных связей они широко использовались.

Другим источником незатухающих колебаний в долампный период развития радио был электромашинный генератор высокой частоты. Такой генератор впервые был построен Н. Тесла в 1889—1890 гг., но это было еще до изобретения радио. Первый машинный радиопередатчик был создан в 1906 г. (Р. Фессенден); в последующие годы высокочастотные машинные генераторы разрабатываются в разных странах, в том числе и в России (В. П. Вологдин, 1912 г.)¹. Высокочастотные машинные генераторы отличались от дуговых более высокими к. п. д., устойчивостью и надежностью действия, но были довольно сложными в эксплуатации. Несмотря на то, что дуговые и электромашинные генераторы не получили очень широкого применения, они сыграли положительную роль, позволив выяснить преимущества передачи незатухающими колебаниями и усовершенствовать технику радиоприема. Путем включения электромеханических прерывателей (тиккер) в приемниках для незатухающих колебаний была создана весьма хорошая система радиотелеграфной связи, вытеснившая, несмотря на большую дороговизну, радиотелеграфию на незатухающих и слабо затухающих колебаниях.

Радиоприемные устройства

Что касается развития радиоприемных устройств в рассматриваемый период, то первые приемники варьировали в большей или меньшей степени грозоотметчик Попова. Развитие приемных устройств шло в направлении усложнения приемной схемы и улучшения при этом качества приема. Вынесение когерера из цепи антенны повлекло за собой уменьшение затуханий антенного контура, а введение настройки колебательных контуров повысило избирательность и чувствительность приема; улучшению этих качеств приемника способствовало применение вместо когерера

¹ В этих генераторах применялись умножители частоты, так как сами генераторы давали колебания недостаточных частот.

детекторов разных типов. В течение 1902—1905 гг. были разработаны магнитные, термические и электролитические детекторы, а в период 1906—1908 гг. широкое распространение получил появившийся еще ранее (1900 г.) кристаллический детектор в разных его модификациях. Разработанные в это время кристаллодетекторные приемники, постепенно совершенствуясь, имели распространение почти до конца 20-х годов нынешнего века.

Полный переворот в развитии радиоприемных и радиопередающих устройств произошел в связи с изобретением электронной лампы, получившей очень широкое распространение.

Изобретение электронной лампы. Первый ламповый генератор

Принцип действия электронной лампы основан на явлении термоэлектронной эмиссии; это явление впервые наблюдалось Т. Эдисоном в 1883 г. и известно под названием «эффекта Эдисона». Занимаясь усовершенствованием электрических ламп накаливания, Эдисон не мог не обратить внимания на то, что стеклянная колба лампы сравнительно быстро покрывается темным налетом, ослабляющим силу света лампы (впоследствии было установлено, что потемнение колбы происходит исключительно за счет распыления материала самой нити). Кроме того, Эдисон, отметив, что в связи с этим угольная нить лампы быстро перегорает. Стремясь увеличить срок службы угольной нити и выяснить причины потемнения колбы, он произвел ряд экспериментов. Один из его опытов заключался в следующем: внутри стеклянной колбы против нити была укреплена изолированная металлическая пластинка (рис. 9-7) с выходящим наружу вводом; при присоединении этой пластинки к положительному полюсу батареи, питающей лампу током, стрелка гальванометра, включенного в цепь пластинки, отклонялась. Это показывало, что между угольной нитью и пластинкой внутри колбы проходит электрический ток. Было также подмечено, что этот ток возрастает по мере увеличения степени накала нити. Если

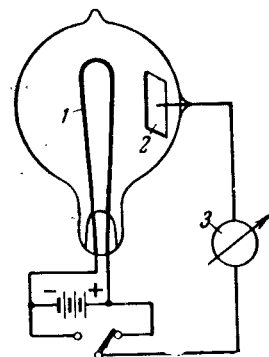


Рис. 9-7. Схема опыта Эдисона.

1 — нить накала; 2 — металлическая пластинка; 3 — гальванометр.

металлическую пластинку соединить с отрицательным полюсом батареи, то стрелка гальванометра остается неподвижной. Вначале указанное наблюдение не получило правильного объяснения, но после того как был открыт электрон и выяснена его роль при электрических разрядах в газах и вакууме, было установлено, что в опытах Эдисона имело место испускание электронов накаливаемой нитью.

Явление термоэлектронной эмиссии быстро привлекло внимание исследователей; стали делаться попытки измерения величин, характеризующих это явление.

Дальнейшее изучение процессов, происходивших в электрической лампе, внутри которой находился металлический электрод, соединенный с источником тока, показало, что подобное устройство способно пропускать электрический ток только в одном направлении, т. е. служить выпрямителем. В 1904 г. английский ученый Д. А. Флеминг разработал конструкцию двухэлектродной лампы — диода (рис. 9-8) и предложил применить такую лампу в качестве детектора в радиоприемных устройствах. Но диоды как электровакуумные приборы еще в течение около 10 лет после их изобретения были технически несовершенными, и это препятствовало их широкому внедрению для целей детектирования.

Последующие многочисленные эксперименты с двухэлектродной лампой (Вайнтрауб, 1904 г.; Ли де Форест, 1907 г.) привели к открытию очень важного факта — возможности управления при помощи дополнительного металлического электрода (сетки) потоком электронов, испускаемых накаливаемой нитью. Такая конструкция трехэлектродной лампы получила название триода (рис. 9-9). Исследования процессов, происходящих в триоде, показали, что знак заряда сетки определяет уменьшение (в случае если сетка заряжена отрицательно) или значительное усиление (при положительном заряде сетки) анодного тока лампы. Поэтому трехэлектродная лампа могла употребляться не только в качестве детектора, но и главным образом, как усилитель слабых электрических колебаний.

Как уже отмечалось, существовавшие генераторы высокочастотных колебаний имели ряд серьезных недостатков. Это заставляло ученых и инженеров интенсивно заниматься изысканием методов улучшения конструкции генерирующих устройств. Исследования электронных ламп, произведенные в течение первого десятилетия текущего столетия, не могли не привести к открытию возможности

использования трехэлектродной лампы в качестве генератора незатухающих электрических колебаний. Опыты показали, что при определенных условиях с помощью трехэлектродной лампы можно преобразовывать подводимую к ней энергию постоянного тока в энергию переменного тока любой частоты. Над изобретением лампового генератора работали ученые разных стран; наибольшую известность получила схема лампового генератора, предложенная в 1913 г. австрийским профессором А. Мейснером.

Ламповый генератор незатухающих колебаний имел ряд преимуществ перед ранее существовавшими высокочастотными передатчиками: простота устройства, экономич-

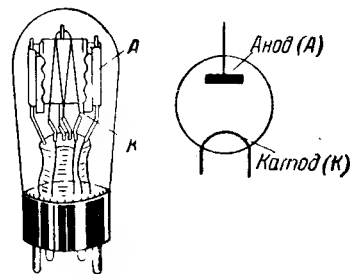


Рис. 9-8. Современный вид и принципиальная схема диода.

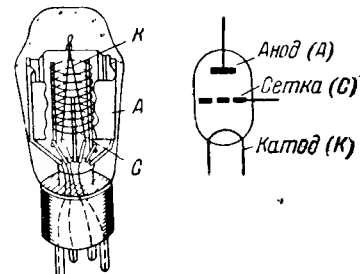


Рис. 9-9. Современный вид и принципиальная схема триода.

ность, стабильность характеристик и устойчивость работы. Электронная лампа как генератор незатухающих колебаний позволила строить радиопередающие устройства в большом диапазоне мощностей и частот. Использование электронной лампы в качестве детектора, усилителя и в особенности генератора имело важнейшее значение для развития радиотехники, так как несовершенство радиопередающих и радиоприемных устройств ограничивало дальность и надежность радиосвязи, потребность в которой начинает все сильнее возрастать. После 1916 г., когда были освоены более совершенные методы откачки ламп, наступил период «технической зрелости» электронной лампы и она стала основным элементом радиотехнических устройств. Дальнейшие успехи в развитии техники радиопередачи и радиоприема привели к решению проблемы радиовещания (1920 г.).

Важное значение в совершенствовании первых конструкций приемно-усилительных и генераторных ламп имели на-

ряду с работами многих зарубежных ученых и инженеров труды наших соотечественников Н. Д. Папалекси и М. А. Бонч-Бруевича. Так, М. А. Бонч-Бруевичем впервые были созданы мощные генераторные лампы с водяным охлаждением, получившие широкое распространение в мировой радиотехнике; им же была разработана теория триода. Большую роль в развитии отечественной радиотехники сыграла Нижегородская радиолaborатория, созданная в 1918 г.

9-6. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ РАДИОТЕХНИКИ С 1918 г. ПО НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

Период с 1918 по 1940 г. характеризуется становлением радиоэлектроники. Радиотехника и электроника, дополняя друг друга, настолько тесно переплетаются, что трудно даже сказать, где кончается одна научная область и начинается вторая. На основе применения электронных ламп разрабатываются разнообразные радиоприемные и радиопередающие устройства, отличающиеся высокой чувствительностью, дальностью действия, большим диапазоном мощностей и частот.

Возникают и быстро развиваются радиовещание и радиотелефония, осваиваются короткие волны, на которые переводятся все магистральные и международные радиотелеграфные линии связи. Строятся мощные радиовещательные станции, радиопромышленность вступает в период бурного и разностороннего развития. Возникает фототелеграфия — передача по радио неподвижных изображений, получает полную техническую разработку звуковое кино. Практически решается проблема телевидения и создаются первые телевизионные установки, значительного развития достигает радионавигация; расширяется использование высокочастотных колебаний в промышленности (индукционный высокочастотный нагрев), в медицине (высокочастотная терапия).

Значительные успехи были достигнуты и в области теоретических исследований: разработаны теория и методы расчета ламповых генераторов, решены сложные задачи о распространении радиоволн, положено начало применению радиометодов для изучения верхних слоев атмосферы.

Последние два десятилетия, знаменующие современный этап в развитии радиоэлектроники, характеризуются освоением ультракоротких волн, импульсной техники и техники полупроводников. В результате этого стали очень интенсивно развиваться телевидение, радиолокация, радио-

навигация, сверхмногоканальная радиосвязь. За последние годы разработаны разнообразные радиоэлектронные устройства, предназначенные для автоматического управления, регулирования и контроля производственных процессов; все большее применение получают электронные вычислительные машины. Возникли и быстро развиваются новые области науки и техники: радиоастрономия, радиотелен измерение, радиофизика. Достижения радиоэлектроники использованы при запуске искусственных спутников Земли, советских космических ракет и первого советского космического корабля спутника.

Радиоэлектроника все глубже проникает в различные области народного хозяйства, она становится мощным орудием научного прогресса. Дальнейшее совершенствование радиоэлектронных устройств позволит воплотить в жизнь самые дерзновенные мечты человечества.

9-7. ОТКРЫТИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

В изучении электровакуумных процессов и расширении области применения электровакуумных приборов большую роль сыграло открытие явления фотоэлектрического эффекта.

Фотоэлектрическим эффектом в настоящее время называются электрические процессы, при которых поглощение веществом световых квантов (видимых, инфракрасных и ультрафиолетовых излучений) сопровождается освобождением заряженных частиц. При внешнем фотоэффекте поглощение фотонов сопровождается выходом электронов, возбужденных светом, за пределы облучаемого вещества; при внутреннем фотоэффекте возбуждение электронов при поглощении света сопровождается изменением вещества, но не имеет места выход электронов наружу. Возникновение фото-э. д. с. возможно также в пограничном слое между проводником и полупроводником или между металлическим проводником и жидкостью; такой эффект называется фотогальваническим эффектом, а основанные на этом принципе фотоэлементы — вентильными.

Внешний фотоэффект был впервые открыт Г. Герцем в 1887 г. при его опытах с электрическими волнами. Он заметил, что если свет электрической искры одного разрядника падает на отрицательный электрод соседнего разрядника, то в последнем облегчается проскакивание искры. Герц обнаружил также, что если поставить между обоими разрядниками лист обыкновенного стекла, то явление пре-

крашается; кварцевый же лист, помещенный вместо стеклянного, не препятствовал указанному явлению. Отсюда можно было сделать вывод о влиянии ультрафиолетовой части излучений первого разрядника, пропускаемой кварцевым, но поглощаемой стеклянным листом. Однако Герц анализа замеченных явлений не производил.

Год спустя немецкий физик В. Галльвакс показал, что отрицательно заряженная металлическая пластинка теряет свой заряд при освещении ее лучами дуговой лампы, т. е., иными словами, наблюдал выбивание электронов из пластинки лучами света. Та же пластинка, заряженная

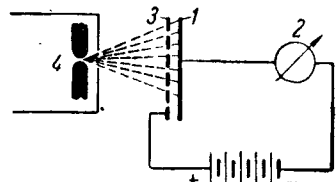


Рис. 9-10. Схема опыта А. Г. Столетова для обнаружения внешнего фотоэлектрического эффекта.

1 — цинковая пластинка; 2 — гальванометр; 3 — металлическая сетка; 4 — дуга.

положительно, обнаруживает эффект в очень слабой степени. В 1888—1889 гг. этим вопросом занимался проф. А. Г. Столетов, которому принадлежит наиболее полное исследование явления внешнего фотоэлектрического эффекта, описанное в его труде «Актиноэлектрические исследования». Схема опыта Столетова по изучению фотоэффекта изображена на рис. 9-10. Цинковая пластинка соединена через гальванометр с отрицательным

полюсом батареи, положительный полюс которой соединен с металлической сеткой. При освещении цинковой пластинки электрической дугой стрелка гальванометра отклоняется, показывая наличие в цепи тока.

Своими оригинальными опытами А. Г. Столетов не только доказал, что отрицательно заряженный проводник теряет свой заряд при освещении его лучами света (возникновение фототока), но и установил закон пропорциональности между фототоком и интенсивностью падающего света, открыл явление «тока насыщения» при фотоэффекте. Важное значение для последующего практического применения фотоэффекта имело установление Столетовым факта безынерционности этого явления.

А. Г. Столетовым были впервые произведены исследования фотоэффекта в условиях вакуума. Помещая указанные металлическую пластинку и сетку в стеклянный сосуд, из которого был выкачан воздух, он показал, что отношение произведения величины давления газа, при котором

ток имеет максимальное значение $P_{\text{макс}}$, на расстояние между пластинкой и сеткой l к величине напряжения на пластинках U есть величина постоянная: $\frac{P_{\text{макс}} l}{U} = \text{const}$ (так называемая «константа Столетова»). Вакуумная установка Столетова явилась по существу первым вакуумным фотоэлементом.

Последующие работы в области внешнего фотоэффекта позволили установить начальную энергию вырываемых электронов и ее зависимость от частоты падающего света (Ф. Ленард), вывести уравнение максимальной кинетической энергии фотоэлектрона (А. Эйнштейн) и дать экспериментальное подтверждение этого уравнения (Р. Милликен). Все это создало предпосылки для построения и практического применения фотоэлементов с внешним фотоэффектом вакуумного и газонаполненного типов. Первые практически пригодные фотоэлементы были построены в 1910 г. (Эльстер и Г. Гейгер) с применением катодов из щелочных элементов в вакууме. Для усиления тока внутри фотоэлемента стала использоваться вторичная электронная эмиссия, исследованная в трудах советского ученого П. В. Тимофеева. Советскому ученому Л. А. Кубецкому принадлежат работы по фотоумножителям, приведшие к дальнейшему усовершенствованию фотоэлементов с внешним фотоэффектом.

Изучение свойств селена, приведшее к созданию фотоэлемента с внутренним фотоэффектом (фотосопротивление), началось вскоре после того, как впервые был получен в чистом виде селен (И. Я. Берцеллиус, 1817 г.). Было установлено, что в нагретом или расплавленном состоянии проводимость селена повышается; меняется его сопротивление и при освещении. В. Сименс использовал это явление для построения фотометра (1887 г.). Открытие чувствительности фотосопротивлений из сернистого таллия, обработанного кислородом, к инфракрасным излучениям позволило фотоэлементы этого типа (таллофидные) применять для измерений инфракрасной радиации.

Фотосопротивления отличаются простотой устройства (например, селеновый фотоэлемент представляет собой пластинку селена), обладают высокой чувствительностью, малогабаритностью, устойчивостью в работе, удобством использования; благодаря этому они получили применение в различных автоматических аппаратах и устройствах.

Фотогальванический эффект был открыт Э. Беккерелем.

лем в 1839 г. на границе металлического электрода и жидкого электролита. Позднее, в 1876 г., это же явление было обнаружено на границе двух твердых тел Адамсом и Мэем. Подробное изучение фотогальванического эффекта осуществил профессор Казанского университета В. А. Ульянин. Однако к этому явлению долгое время — почти полвека — не проявлялось заметного интереса. Только с середины 20-х годов фотогальванический эффект получил применение в виде так называемых вентильных фотоэлементов (или элементов с фотоэффектом в запирающем слое). В качестве примера фотоэлемента можно назвать медно-закисный фотоэлемент, состоящий из медного диска, покрытого слоем светочувствительного вещества — закиси меди; на поверхность меди наносится тонкий слой золота, прозрачный для света. При освещении элемента между медью и золотом возникает разность потенциалов. Вентильные фотоэлементы получили широкое применение в фотометрии, а также в различных автоматических устройствах, в частности таких, где воздействие должно осуществляться без какого-либо источника тока.

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

ПЕРИОД РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

СУЩНОСТЬ, ОСОБЕННОСТИ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ

10-1. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ

Социально-
экономическая
характеристика
эпохи

Каждая предшествующая экономическая формация, развивая свою материально-техническую базу, подготавливает условия для рождения но-

вой, более прогрессивной общественно-экономической формации. Капиталистическое общество, возникнув на базе полученного от феодализма ремесленного производства, через мануфактуру пришло к машинному производству — своей материально-технической базе.

Крупная промышленность, крупное машинное производство стали частной собственностью сначала отдельных лиц, а затем более или менее крупных капиталистических объединений. Новая техника, в том числе и энергетическая, новые производственные условия значительно повышали производительность труда и создавали объективные предпосылки к дальнейшему укрупнению производства, а следовательно, и к дальнейшему обобществлению труда. Значительную роль в процессе концентрации производства сыграли электроэнергетика и особенно решение проблемы передачи электроэнергии на большие расстояния. Линии электропередач явились артериями, питавшими энергией промышленные районы и обеспечивавшими осуществление процесса концентрации и централизации капиталистического производства.

В конце XIX и начале XX вв. господствующие позиции в мировой экономике захватили крупные промышленные и

торговые комбинаты, тресты или картели, осуществлялся переход к высшей стадии капитализма—империализму.

Тресты и картели получили возможность на базе применения новейших достижений науки и техники систематически повышать производительность труда и снижать себестоимость продукции и, с другой стороны, возможность устанавливать монопольные цены. Это приводило к непрерывному росту прибылей в крупных капиталистических объединениях и гибели мелких предприятий. Но устранение конкуренции между мелкими предпринимателями и монополиями не устранило, а наоборот, обострило конкуренцию между монополиями. А эта конкуренция носит неизмеримо более жестокий и опасный характер. Соглашения о разделе мировых рынков между монополиями никогда не оставались прочными в течение длительного времени. Экономическая борьба между монополиями и находящимися под их контролем правительствами неоднократно приводила к малым и большим войнам. При этом нужно иметь в виду, что война на современном этапе является не только средством разрешения противоречий между сверхтрестами, но и средством сбыта продукции, средством для получения сверхприбылей. Наконец, сама подготовка к войне тоже представляет собой некоторый выход для противоречий, терзающих капиталистическую экономику, удерживает ее на сравнительно высоком уровне и отодвигает сроки разрушительных кризисов перепроизводства.

Но никакие временные конъюнктурные явления не могут оградить капитализм от действия объективных законов общественно-экономического развития. Марксистская наука неопровержимо доказала, а теперь уже и подтвердила это на практике, что усовершенствования техники с исторической неизбежностью ведут к концентрации средств производства и обращения, все более обобществляя процесс труда в капиталистических предприятиях и создавая тем самым материальную возможность и необходимость замены капиталистических производственных отношений социалистическими. В «Манифесте Коммунистической партии» К. Маркс и Ф. Энгельс писали, что «с развитием крупной промышленности из-под ног буржуазии вырывается сама основа, на которой она производит и присваивает продукты. Она производит прежде всего своих собственных могильщиков. Ее гибель и победа пролетариата одинаково неизбежны»¹. Таким образом, капитализм создает не только материально-техническую базу будущего общества,

но и ту общественную силу, которая призвана историей осуществить переход к этой новой общественно-экономической формации.

Вместе с эпохой империализма наступила эпоха пролетарских революций. Известно, что главным содержанием современного исторического этапа является переход от капитализма к коммунизму. И этот переход от старой общественной формации к новой полностью согласуется с переходным состоянием в развитии производительных сил общества.

Если первый промышленный переворот, утвердивший господство капитализма, дал возможность существенно для своего времени повысить производительность труда и освободить многих людей от тяжелого физического труда, то развивающаяся в настоящее время промышленная революция призвана глубоко автоматизировать производство, сделать труд в неизмеримо большей степени производительным и в значительной степени освободить человека не только от физического труда, но и от монотонной канцелярской работы и выполнения многих логических функций. Труд перестанет быть изнурительным и утомляющим занятием, он будет приносить удовлетворение трудящемуся человеку. Однако завершение этого перехода непременно требует новых, коммунистических общественных отношений. Именно в таком направлении и развивается современное общество; в этом состоит сущность переходного периода.

Роль электрификации
в общественном
производстве

В развитии механизации и автоматизации производства, в повышении производительности труда, культуры производства и быта, в развитии новой научно-промышленной революции чрезвычайно велика роль электрификации.

Известно, что для того чтобы повысить производительность труда и сделать его более легким, человек наряду с передачей машинам выполнения ряда производственных процессов вынужден во все большей степени использовать энергию природы. Для этого он в свое время строил ветряные и водяные колеса, паровые машины, а затем водяные и паровые турбины, позволявшие движение воды и внутреннюю энергию пара преобразовывать в вращение вала.

¹ «Манифест Коммунистической партии», Госполитиздат, 1953, стр. 46.

С укрупнением производства и ростом промышленных районов все острее начинал сказываться разрыв между местонахождением природных ресурсов энергии (водных потоков, залежей горючего) и местонахождением ее потребителей.

В качестве переносчика энергии от места ее концентрации в природе к месту ее потребления и распределения по рабочим машинам был использован метод получения вторичной энергии. Весьма гибкой, хорошо транспортабельной и легко трансформируемой вторичной энергией является электрическая энергия, и поэтому проблема энергоснабжения все более начинала приобретать характер проблемы электроснабжения. Это значит, что первичная энергия может заимствоваться у природы в любой имеющейся форме, доступной использованию на данном этапе развития науки и техники. Затем эта первичная энергия преобразуется во вторичную — электрическую (см. гл. 6), передается к месту потребления и здесь распределяется. Иногда может оказаться более выгодным транспортировать энергию вместе с ее носителем (например, современные нефтепроводы и газопроводы, транспорт концентрированного высококалорийного топлива), но до сих пор еще не найдено более экономичного и удобного распределения энергии между отдельными потребителями, чем электрическое распределение.

Итак, электрификация позволяет производить громадные количества электроэнергии в местах, богатых природными энергетическими ресурсами, и экономично передавать, распределять и дробить эту энергию до мельчайшей доли. Электропривод, электрическая технология и электрическое освещение коренным образом преобразуют промышленное производство¹. Именно этим объясняется исторический факт быстрого развития электропромышленности. В. И. Ленин указывал, что электрическая промышленность была самой типичной для новейших успехов техники, для капитализма конца XIX и начала XX вв.

Понятие «электрификация» удобно рассматривать

¹ О том, насколько электрификация повышает производительность труда, можно судить по следующему грубому расчету. Человек, выполняющий физическую работу, может развить в среднем мощность, равную $1/15$ квт. На современной гидроэлектростанции на 1 000 квт приходится в среднем обслуживающего персонала примерно 1 чел. (это даже несколько завышенная цифра). Таким образом, на гидроэлектростанции производительность труда человека в 15 000 раз выше, чем в том случае, если бы он использовал свои мускульные усилия.

с двух точек зрения: с технической и экономической. *Техническая сущность электрификации состоит в развитии комплекса сооружений и средств, необходимых для производства, распределения и использования электрической энергии.* Таким образом, в этом случае речь идет о развитии электрических станций, сетей, систем, электрических машин, транспорта, печей, ламп, устройств для использования электроэнергии в технологических целях.

Экономическая народнохозяйственная сущность электрификации представляет собой более широкое понятие и характеризуется обычно, как процесс внедрения в народное хозяйство крупного, широко автоматизированного машинного производства, который в условиях текущего столетия связан с глубоким проникновением электричества в промышленность, транспорт, сельское хозяйство и другие отрасли. Следовательно, в данном аспекте *электрификация рассматривается как наиболее мощный фактор и вместе с тем как символ глубоких экономических преобразований в народном хозяйстве.*

Основоположники научного социализма в первых опытах применения электрической энергии сумели увидеть будущую революционную роль электрификации как сильнейшего средства повышения производительности и культуры труда, способного оказать решающее воздействие не только на развитие техники, но и на развитие общественного производства в целом. Широко известно высказывание К. Маркса об электрической искре, которая в качестве силы, революционизирующей производство, приходит на смену «его величеству» пару. Выше уже приводилась выдержка из письма Ф. Энгельса к Э. Бернштейну, в котором, говоря об «электротехнической революции», вызываемой решением проблемы электропередачи, Энгельс писал: «Совершенно ясно, что благодаря этому производительные силы настолько вырастут, что управление ими будет все более и более не под силу буржуазии»¹.

Исключительное значение придавал электрификации В. И. Ленин. Он сформулировал свои взгляды по этому вопросу еще задолго до Великой Октябрьской социалистической революции. Анализируя развитие капитализма в России, В. И. Ленин в 90-х годах прошлого столетия указывал на универсальный характер электроэнергии и на большие возможности применения ее в промышленности и сельском хозяйстве.

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс, Соч., т. 27, стр. 289, изд. 2-е, 1955.

Позднее, в 1913 г., Ленин писал: «Электрификация» всех фабрик и железных дорог сделает условия труда более гигиеничными, избавит миллионы рабочих от дыма, пыли и грязи, ускорит превращение грязных отвратительных мастерских в чистые, светлые, достойные человека лаборатории. Электрическое освещение и электрическое отопление каждого дома избавят миллионы «домашних рабынь» от необходимости убивать три четверти жизни в смрадной кухне.

Техника капитализма с каждым днем все более и более *перерастает* те общественные условия, которые осуждают трудящихся на наемное рабство¹.

В. И. Ленин во всех деталях разработал вопрос о роли электрификации в создании материально-технической базы социализма.

Начавшийся в конце XIX в. процесс электрификации вооружал капиталистические монопольные объединения новым важнейшим средством для технического прогресса. Но вместе с тем электрификация более, чем какое-либо другое средство, способствовала дальнейшему развитию процесса централизации производства, процесса обобществления труда. Все это, как уже отмечалось выше, создавало экономические условия для социальной революции. Таким образом, электрификация народного хозяйства и оказалась тем троянским конем, которого согласно образу В. Либкнехта «буржуазное общество в самоубийственном ослеплении — как некогда троянцы и троянки — ликуя вводило в свой Илион и который нес ему с собою верную гибель»².

Итак, электрификация, позволяя широко использовать природные энергетические ресурсы, наилучшим образом размещать производительные силы по территории страны, глубоко механизировать и автоматизировать производство, непрерывно увеличивает производительность общественного труда. И если техническая сущность электрификации практически безразлична к общественному строю, и с этой точки зрения мы можем рассматривать развитие электрических станций, машин, аппаратов и т. п. независимо от того, в какой стране они строятся и производятся, то для экономического содержания и политической оценки электрификации далеко не безразличны общественные условия,

¹ В. И. Ленин, Соч., изд. 4-е, т. 19, стр. 42.

² В. Либкнехт, Из воспоминаний о Марксе. Избранные произведения К. Маркса, т. 1, 1941, стр. 106.

при которых она развивается. Безразличны прежде всего потому, что повышение производительности труда дает совершенно различные эффекты для рабочего при капиталистическом и социалистическом способах производства. В первом случае производительность труда практически никак не связана с благосостоянием рабочего, ибо весь производимый продукт поступает в распоряжение капитала или группы капиталистов, а рабочий получает зарплату в соответствии с условиями найма. Во втором случае, в социалистических странах, где исключена возможность накопления богатств в руках одних людей за счет эксплуатации других, распределение производимых продуктов производится в соответствии с интересами общего коллектива трудящихся; поэтому в этих странах увеличение производительности труда прямо связано с повышением благосостояния трудящихся.

В силу указанного принципиального различия мы в этой главе, не занимаясь анализом технической сущности электрификации, рассмотрим общие особенности и пути электрификации отдельно капиталистических и социалистических стран. При этом выделим особо вопрос об электрификации первой страны социализма — Советского Союза.

10.2. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ В КАПИТАЛИСТИЧЕСКИХ СТРАНАХ

Общей характерной особенностью электрификации в капиталистических странах является ее стихийный, бесплатный, анархический характер. В области энергетики, пожалуй, больше, чем в любой другой отрасли производства, проявляется основное противоречие капиталистического общества: противоречие между общественным характером производства и частной формой присвоения.

В. И. Ленин, анализируя социальный характер электрификации, писал: «...пока остается капитализм и частная собственность на средства производства, электрификация целой страны и ряда стран, во-первых, не может быть быстрой и планомерной; во-вторых, не может быть произведена в пользу рабочих и крестьян. При капитализме электрификация неминуемо поведет к усилению гнета крупных банков и над рабочими и над крестьянами»¹.

Если на первых этапах электрификации ее стихийный характер еще не вызывал резких столкновений интересов

¹ В. И. Ленин, Соч., изд. 4-е, т. 33, стр. 112.

отдельных компаний и государств, то перед первой мировой войной (1914—1918 гг.) и особенно после нее пороки капиталистического производства в области энергетики стали проявляться все более заметно.

Частнокапиталистические предприятия хищнически расходо­вали энергетические ресурсы. И уже вскоре после первой мировой войны во Франции, Германии, Англии и других странах начали работать правительственные и неправительственные комиссии, которые пришли к выводу о необходимости определенной регламентации в использовании энергетических ресурсов. Указывалось, что снабжение энергией должно быть изъято из частных рук, что дело энергоснабжения должно вести государство. Эти комиссии утверждали, что капиталистические предприятия, заботясь только о своей выгоде, никогда не будут заинтересованы в наиболее экономичном и эффективном с общегосударственных позиций расходовании энергетических ресурсов.

Мысль о том, что производительные силы перерастают руководство буржуазии, что частный капитал со временем оказывается не в силах управлять техникой крупных масштабов и высоких параметров, ярко иллюстрируется примерами электрификации. Так, в Лондоне в 1925 г. насчитывалось 77 электрических станций и 50 сетей. Они работали более чем на 20 различных напряжениях и нескольких частотах. Сети принадлежали различным конкурирующим компаниям и вопреки логике технического прогресса продолжали существовать раздельно. Не случайно поэтому правительство Англии вынуждено было в 1926 г. взять под свой контроль всю систему энергоснабжения, а в 1947 г. провести национализацию всех электростанций (конечно, на условиях, выгодных для их прежних владельцев). Только применив эту меру «обобществления» электрохозяйства, капиталистическому государству удалось последовательно решать вопросы объединения всех энергетических систем в единую энергетическую систему страны, т. е. привести одну из важнейших отраслей промышленного производства в соответствие с требованиями современной науки и техники. Частному капиталу подобные мероприятия оказываются не под силу.

В этом отношении весьма характерна история гидроэлектростроительства в капиталистических странах. Известно, что для сооружения гидроэнергетического комплекса необходимы столь значительные вложения основного капи-

тала, что строительство гидроэлектростанций оказывается по плечу только крупнейшим монополиям или государству. Эту мысль удачно сформулировал акад. Г. М. Кржижановский, который писал: «Вот почему эра капиталистического гидроэлектростроительства является сравнительно недавней и совпадает с эрой гегемонии монополистического капитала».

Приведенные примеры, между прочим, хорошо иллюстрируют тот факт, что современный капитализм основывается на несоответствующей ему материально-производственной базе. Он существует лишь постольку, поскольку капитализм стал монополистическим, стал империализмом.

К развитию электрификации в капиталистических странах приковано внимание руководящих деятелей государств и монополий потому, что она создает базу для всего промышленного производства. Немалую роль в этом отношении играет и то обстоятельство, что колоссальные количества электроэнергии потребляет гипертрофированное военное производство. Достаточно сказать, что только на производство атомного оружия в США в 1956 г. было израсходовано около 60 млрд. кВт·ч электроэнергии, т. е. больше, чем вырабатывают все электростанции Франции. Этими обстоятельствами объясняется наличие в капиталистических странах тенденции к непрерывному росту производства электроэнергии. Этими же обстоятельствами объясняется и весьма высокий уровень технических достижений в области электроэнергетики в крупнейших капиталистических странах.

В таблице приведены цифры, характеризующие рост производства электроэнергии (млрд. кВт·ч) в основных капиталистических странах и потребление на душу населения (кВт·ч/чел) в 1955 г.

Годы	1913	1929	1938	1940	1944	1950	1955	Потребление на душу населения в 1955 г.
Страны								
США	22,5	115,8	142	179,9	279,5	388,7	625	3782
Германия (после войны—ФРГ)	5,1	30,7	55,3	63,0	74,3	44,5	76,3	1530
Англия	4,5	17,0	33,7	38,7	49,0	66,5	89,2	1735
Франция	1,8	15,6	20,1	18,8	16,1	36,6	49,6	1151
Япония	1,5	15,1	32,7	34,7	37,1	44,9	64,1	710
Норвегия	2,0	7,63	9,9			17,8	22,7	6780
Канада	4,0	19,3	28,6			55,0	78,6	5060

Дать сколько-нибудь исчерпывающую характеристику развития электрификации даже в крупнейших капиталистических странах здесь не представляется возможным. Поэтому мы ограничимся лишь более подробной характеристикой современной электроэнергетики США и отметим наиболее характерные особенности развития электрификации в капиталистических странах вообще.

Электроэнергетика США

Соединенные Штаты Америки по электробалансу занимают первое место в мире. В этой стране производится примерно столько же электроэнергии, сколько во всех других капиталистических странах, вместе взятых. В 1957 г. выработка электроэнергии достигла 725 млрд. кВт·ч, а общая установленная мощность на 1 января 1958 г.

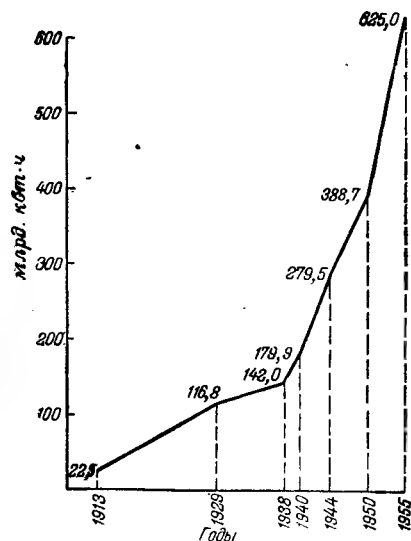


Рис. 10-1. Рост выработки электроэнергии в США (1913—1955 гг.). Ежегодный прирост электроэнергии по периодам: 1913—1929 гг. — 7%; 1929—1938 гг. — 2%; 1940—1944 гг. — 12%; 1944—1950 гг. — 6%; 1945—1955 гг. — 9%.

частное предпринимательство, большая часть энергосистем принадлежит двум десяткам частных компаний.

В США действуют крупнейшие в мире тепловые электрические станции, оборудованные крупными агрегатами. Некоторые из этих станций указаны в следующей ниже таблице.

Как видно из таблицы, турбоагрегаты действуют по блочной схеме — с одним котлом на турбину. В электрической части станций в настоящее время обычно применяется схема блок генератор-трансформатор. С 1955 г. компания Вестингауз для тепловой электростанции Эдистон приступила к строительству турбоагрегатов мощностью 325 тыс. кВт.

составила 140 млн. кВт. Развитие электрификации протекает крайне неравномерно (рис. 10-1). Если до 1929 г. средний ежегодный прирост выработки электроэнергии в США был равен 7%, значительно опережая средний процент прироста для всего мира, не превосходящий 4%, то в период 1929—1938 гг. этот прирост упал до 2%. Развитие военной промышленности в 1940—1944 гг. дало наивысшие темпы годового прироста, достигшие 12%. В послевоенный период 1944—1950 гг. темпы снизились вдвое и составляют только 6%. С начала войны в Корее (1950 г.) и до настоящего времени высокие темпы прироста (9%) удерживаются за счет гонки вооружений и военных поставок ряду капиталистических и экономически зависимых стран.

В США действуют крупные энергетические системы с линиями электропередачи 60—230 кв. Наблюдается стремление строить линии 330 кв и ведется проектирование линии на напряжение 500 кв.

В электроэнергетике США в значительной степени сохранилось

Наименование станции	Год пуска в эксплуатацию пер-вого агрегата	Установлен-ная мощность, тыс. кВт	Число и мощность турбоагрегатов, тыс. кВт	Число и производительность котлов, м/ч	Давление пара, ат
Кингстон	1954	1600	4×150 5×200	4×453 5×580	126
Шоуни	1953	1500	10×150	10×453	126
Клифти-Крик	1955	1290	6×215	6×602	140
Галатин	1956	500 (по проекту 2 000)	2×250	2×800	140

Следующая таблица дает представление о крупнейших гидростанциях Соединенных Штатов Америки.

Наименование станции	Река	Год пуска в эксплуатацию пер-вого агрегата	Полная проектная мощность, тыс. кВт	Число агрегатов	Напор брутто, м	Высота плотины, м
Грэнд-Кули	Колумбия	1941	1 974	19	107	168,8
Чиф-Джозеф	"	1955	1 728	27	50	45,8
Даллес	"	1957	1 716	16	25	—
Мак-Нэри	"	1953	1 400	14	24	48,2
Гувер (Боулдер-Дэм)	Колорадо	1936	1 354	16	161	222

В последние десятилетия в США наблюдается очень быстрое развитие электроэнергетики. Действительно, среднегодовой прирост мощности электростанций за период 1945—1955 гг. составлял 7 млн. кВт, а прирост выработки электроэнергии за тот же период — 32,3 млрд. кВт·ч. Такой колоссальный прирост выработки электроэнергии обеспечивается вводом новых мощностей и увеличением числа часов использования установленной мощности. И на то и на другое существенное влияние оказывает форсированное развитие военной промышленности. Так, например, в течение военных 1940—1944 гг. число часов использования установленной мощности выросло с 3 600 до 4 700. Наиболее крупные электростанции страны сосредоточены в районах развитой атомной и военной отраслей промышленности (бассейн р. Теннесси). Такая крупнейшая электростанция, как Шоуни, построена специально для снабжения электроэнергией атомного завода в штате Кентукки.

Рост электроэнергетики США, между прочим, опровергает развиваемую некоторыми буржуазными учеными тео-

рию о «затухающей кривой электрификации». Согласно этой теории темпы электрификации должны замедляться по мере «насыщения» промышленности, транспорта и быта электрифицированными устройствами. Однако в общем энергетическом балансе электрическая энергия представляет еще столь малую долю, а новые процессы (в том числе ядерные) требуют столь больших количеств электроэнергии, что ни о каком затухании кривой электрификации, вызванном объективными условиями развития техники, не может быть и речи. Если и могут наблюдаться спады и провалы в темпах электрификации, то только в силу действия экономических законов капитализма (кризисы, военная разруха).

Анализ развития электроэнергетики в капиталистических странах позволяет выявить наиболее характерные особенности и условия капиталистической электрификации.

Условия и особенности электрификации капиталистических стран

Одной из наиболее существенных особенностей электрификации в капиталистических странах является уже отмеченная выше бесплановость развития. Однако очевидный общий анархический характер капиталистического производства не останавливает буржуазных ученых и инженеров, пытающихся планировать развитие энергохозяйства. Слишком велико воздействие опыта социалистического планирования и его результатов на умы зарубежных деятелей энергетики, чтобы они отказались от попыток достигнуть аналогичных результатов в своих странах. Тем более, что организация производства внутри современных сверхтрестов позволяет в некоторой степени пользоваться преимуществами планового ведения хозяйства. Особенно показателен в этом отношении опыт планирования и координации научных и инженерно-технических работ в области военной техники. Наиболее характерным примером этого является вся история создания в США атомной бомбы, потребовавшей мобилизации колоссальных ресурсов и координации многих усилий.

Известен ряд попыток составления планов развития энергохозяйства как внутри одной капиталистической страны, так и в ряде стран. Ведется перспективное планирование развития энергетики в капиталистических странах и в настоящее время.

Насколько неустойчивы основы капиталистического планирования, можно видеть из рис. 10-2, заимствованного

из американских источников и относящегося к 1950 г. Возможности развития здесь оцениваются в широком диапазоне 3—8% ежегодного прироста путем экстраполяции роста среднего душевого потребления либо за последние три десятилетия (А), либо за одно десятилетие 1940—1950 гг. (В), либо, наконец, исходя из усредненного душевого потребления за предшествовавшие 30 лет (С). Как показы-

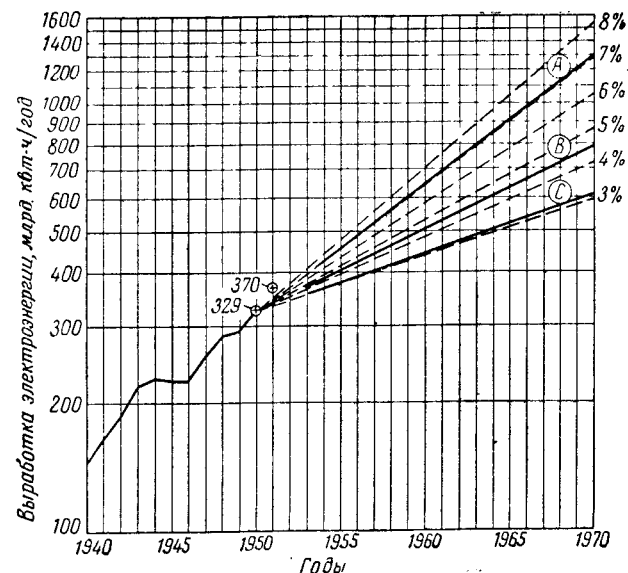
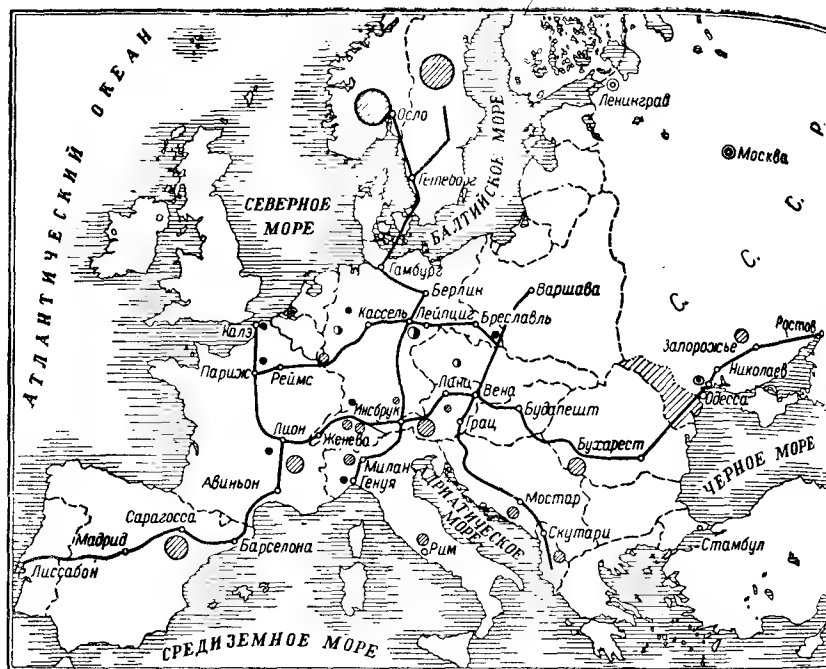


Рис. 10-2. Планирование перспектив роста выработки электроэнергии в США.

зает жизнь, решающим фактором является смена кризисных состояний более или менее устойчивыми, связанными с разжиганием военного психоза. Эти факторы учету не поддаются, а поэтому все попытки планирования успеха иметь не могут.

Наиболее талантливые представители зарубежной науки и техники затрачивают огромные усилия для разработки полуутопических планов создания единых энергетических систем в Европе и Америке. В качестве одного из таких примеров можно привести проект единой энергетической системы Европы, предложенный в 1930 г. Оскаром Оливером (рис. 10-3). По этому плану предполагалось построить линии электропередачи общей протяженностью



Предполагаемые энергетические ресурсы:

- Основные обозначения:
- Гидроэнергия
 - Тепловая энергия (уголь)
 - Тепловая энергия (лигнит)
 - Тепловая энергия (нефть)

Масштаб:
150 км 0 150 300 450 600 750 900 1050 км

Рис. 10-3. Проект единой энергетической системы Европы (проект Оливена).

10 000 км и напряжением 400 кВ, которые должны были пересечь Европу трижды с севера на юг и дважды с запада на восток.

Не меньший интерес представляет проект Зоргеля по комплексному использованию бассейна Средиземного моря (рис. 10-4). Проект предусматривает строительство четырех плотин: Гибралтарская и Дарданельская регулируют приток воды из Атлантического океана и Черного моря, а Тунисская и Мессинская делят Средиземное море на две части; между ними и Атлантическим океаном уровень воды понижается на 110 м. За Дарданельской, Тунисской и Мессинской плотинами уровень Средиземного моря снижается еще на 110 м. Осушаются показанные на карте черным плодородные земли, а ежегодный расход воды за счет Атлантического океана, Черного моря, рек и дождей

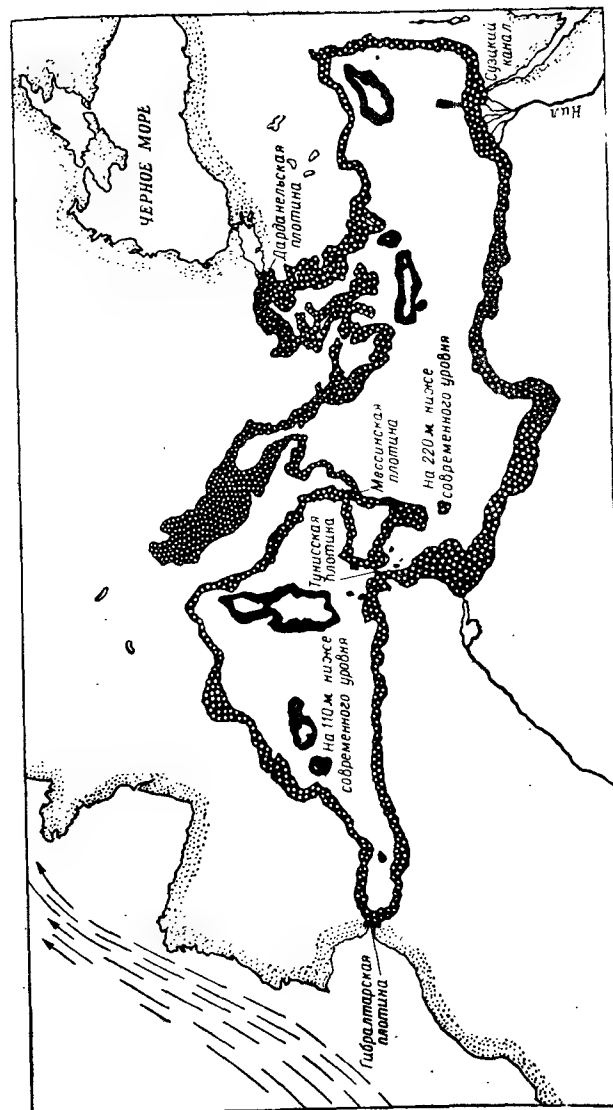


Рис. 10-4. Схематическая карта использования водной энергии Средиземноморского бассейна.

в количестве 4 144 км³ в год позволяет получить громадное количество электроэнергии.

Все планы межгосударственных энергетических объединений предполагали единство интересов капиталистических стран и их дружественные взаимоотношения. Но слишком эфемерной оказывается всегда «дружба» между капиталистическими странами, и призрачные воздушные замки единых энергетических объединений разрушаются в силу действия объективных законов капитализма, которые не только углубляют противоречия между трестами, монополиями, но и между странами и нередко приводят к войне капиталистических стран друг с другом. В связи с этим объединение энергетических систем различных стран может быть только временным.

Не менее сомнительными оказываются перспективные планы развития энергобаланса, поскольку, как указывалось выше, никогда нельзя точно учесть то влияние, которое окажет на экономику страны цикличность развития капиталистического хозяйства. Своеобразным примером капиталистического планирования является опыт составления прогнозов в Швейцарии. В этой стране были разработаны три варианта пятилетнего развития: один вариант — на случай экономического кризиса, второй — для «нормальных» условий и третий — для периода экономического процветания.

Следующей особенностью электрификации в капиталистических странах является неравномерность развития. В одной и той же стране наряду с новейшими достижениями технического прогресса существует устаревшее оборудование. Крайне неравномерно и развитие электрификации в разных странах. Так, душевое потребление электроэнергии в 1955 г. находилось в пределах от 6 780 квт·ч (Норвегия) до 5—15 квт·ч (Судан и др.). Особенно значительно различие в энергобалансах основных капиталистических стран, с одной стороны, и колониальных, полуколониальных и зависимых стран — с другой. Для последних стран душевое потребление электроэнергии обычно не превышает 110 квт·ч, тогда как для первых оно выше 1 000 квт·ч.

Одним из проявлений неравномерности развития электрификации может служить пример развития энергохозяйства ФРГ. На дрожжах американского капитала был быстро восстановлен довоенный промышленный потенциал Западной Германии, а по темпам роста индекса промыш-

ленного производства, по росту электровооруженности за последние 10 лет Западная Германия значительно обгоняет как Англию, так и США.

Особенностью электрификации в капиталистических странах является существование проблемы нагрузки. Особенно острой эта проблема была в период 20—30-х годов текущего столетия. Установленная мощность в эти годы использовалась во Франции менее 2 000 ч в году, в Германии — менее 2 500 ч, в США и Японии — около 3 000 ч. Таким образом, если принять во внимание, что в астрономическом году 8 760 ч, то более 2/3 потенциальной мощности электростанций не использовалось. Проблема нагрузки в указанные годы была главной темой международных энергетических конгрессов, научных дискуссий и специальных журналов. Несколько изменилось положение лишь в военные и послевоенные годы, когда использование установленной мощности по известным причинам значительно возросло. Однако полное решение проблемы нагрузки упирается в капиталистических странах в трудности плановой электрификации.

Одной из наиболее важных особенностей электрификации капиталистических стран является то обстоятельство, что их энергохозяйство развивается в условиях конкурентной борьбы между крупнейшими монополиями, которая характеризует раздирающие капитализм противоречия. Интересы тех или иных фирм нередко идут вразрез с основной линией технического развития и оказывают тормозящее влияние на это развитие. Очень показательными в этом отношении являются трудности, возникающие при строительстве чуть ли не каждой гидроэлектростанции. Известно, что при частной собственности на землю имеются немалые затруднения с развертыванием гидротехнических работ, что строительство гидроэлектростанций, как указывалось выше, «замораживает» на долгий срок капитал, что комплексное гидростроительство часто наносит ущерб интересам нефтяных, угольных и железнодорожных компаний. Все это приводит обычно к тому, что строительство гидроэлектростанций в капиталистических странах может вести только государство. При этом не последнюю роль играет то обстоятельство, что при строительстве гидросооружений представляется возможным занять большое число безработных (например, в США после кризиса 30-х годов).

В течение полувека из-за конкурентной борьбы тор-

мозилось решение вопроса о строительстве водного пути к морю по р. Св. Лаврентия и гидроэлектростанции (мощностью 1,86 млн. квт) на этой пограничной реке. Железнодорожные монополии, портовые власти атлантического побережья, шахтовладельцы, владельцы тепловых электростанций упорно мешали решению этой в высшей степени важной для Канады и США задачи. По этому поводу сенатор Ч. Тобей заявил в 1952 г., что «организованная кучка монополистов, опасаящихся конкуренции или снижения цен на электроэнергию, наводит муть, обманывает людей и с успехом проваливает этот вопрос в конгрессе».

Интересы монополий часто приводят к гипертрофированному развитию одной отрасли техники и замедлению развития другой. Так, в последние годы в капиталистических странах чрезмерно возрастает удельный вес коммунального и бытового потребления электроэнергии и соответственно снижается доля промышленного потребления. Первые группы потребителей дают максимальные прибыли, и поэтому владельцы электростанций тратят колоссальные средства на рекламу (которая, кстати, сама потребляет колоссальное количество электроэнергии) таких едва ли экономически целесообразных на данном этапе в масштабе народного хозяйства страны процессов, как электрическое отопление, приготовление горячей воды и т. п.

Примером тормозящего действия монопольных интересов, помимо приведенного выше примера со строительством ГЭС, может также служить факт определенного застоя в развитии электрификации транспорта в большинстве капиталистических стран. Главной причиной этого является возможность для железнодорожных монополий получать максимальную прибыль при паровой или тепловой тяге и в ущерб народнохозяйственным интересам не вкладывать капитал в дорогое и требующее значительного времени строительство сооружений, необходимых для перевода железных дорог на электрическую тягу.

Наконец, сюда же относится пример нерационального стремления к автаркии производства, т. е. к независимости работы предприятий данного треста от других капиталистических объединений. Таким примером может служить наличие очень большого числа блок-станций, или, как их теперь иногда называют, станций самообслуживающихся предприятий. Известно, что по технико-экономическим соображениям блок-станции в настоящее время целесооб-

разно строить в виде теплоэлектроцентралей, снабжающих предприятия не только электрической, но и тепловой энергией. Но в капиталистических странах стремление к автаркии, вызванное борьбой между монополиями, настолько велико, что доля теплоэлектроцентралей в общей мощности блок-станций оказывается весьма малой.

Следующая особенность развития капиталистической электрификации является как бы дальнейшим развитием предыдущей: конкурентная борьба мировых монополий за рынки сбыта. Это уже не борьба капиталистических группировок внутри одной страны, а борьба, носящая международный характер, характер экономической экспансии и все большего и большего политического давления одних стран на другие. Энергетика, в частности электроэнергетика, занимает ключевые позиции в экономике каждой страны. Отсюда понятен тот интерес, который крупнейшие монополии проявляют к энергетике разных стран. Так, еще перед первой мировой войной директор германского концерна «Всеобщая компания электричества» Ратенау говорил, что он сможет через некоторое время снабжать электроэнергией (а следовательно, и контролировать) основные промышленные центры Европы.

После второй мировой войны все более сильное экономическое и политическое давление на капиталистические страны оказывают монополии США. Если народы активно выступают против прямого политического подчинения США, т. е. против потери своей политической независимости, то им трудно противостоять экономическому проникновению американских монополий.

Электрическая энергия с 20-х годов текущего столетия начала превращаться в предмет международной торговли: осуществляется экспорт и импорт электроэнергии. Так, еще в 20-х годах швейцарские сети соединялись с сетями Южной Германии, Франции и Северной Италии, осуществлялся обмен электрической энергией между США и Канадой. Значительно большие размеры международная торговля электроэнергией приобрела в период после второй мировой войны.

Некоторым новым сверхтрестом полагают сделать планируемую Единую энергетическую систему Европы, включающую в себя энергосистемы Франции, Бельгии, ФРГ, Италии, Швейцарии и других стран. Временное соединение этих систем уже осуществляется главным образом в целях сезонного обмена энергией.

Существенной особенностью развития капиталистической электрификации, которую мы здесь отметим, является влияние борьбы классовых интересов капиталистов и рабочих на развитие электростроительства. Капиталисты боятся вручать рабочим современную технику, а особенно технику электрификации, которая, как уже отмечалось, занимает ключевые позиции в экономике страны. Так, еще в 20-х и 30-х годах текущего столетия, когда интенсивно развивался процесс укрупнения энергетических систем, появились теории об «оптимуме» концентрации энергетического хозяйства. Были попытки доказать, что экономическая выгода достигается только до определенного предела концентрации, а сверх этого предела экономичность концентрации энергохозяйства начинает понижаться.

Но оказалось, что за этими фарисейскими теориями скрывалась боязнь капиталистов идти на крупное «обобществление» производства, боязнь поставить под контроль рабочих и служащих энергетическое хозяйство монопольного объединения или даже всей страны. Так, в одном германском журнале писали в 1930 г. следующее: «Ибо ведь вся жизнь остановится, если этого захочет фактический руководитель электросистемы или тот, кто его поставил...». В начале 20-х годов в Англии обсуждался план централизации энергетики, и палата лордов отвергла этот план. По этому поводу в очерке о развитии энергетики в Великобритании указывалось: «Лорды решили, что все это дело пахнет национализацией и что если электрическая энергия будет производиться на небольшом числе сверхмощных станций, то небольшое количество рабочих на этих станциях может забастовать».

И до сегодняшнего дня капиталисты, строя новые предприятия, всегда вынуждены считаться с теми возможными и неприятными для них последствиями, к которым может привести нарастающая волна экономической и политической борьбы рабочих за свои классовые интересы.

Таковы важнейшие особенности и условия развития электрификации в капиталистических странах.

10-3. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ В СССР

Молодая Советская республика получила в «наследство» от царского правительства отсталую, к тому же еще разрушенную войной энергетику, электротехническую и энергомашиностроительную промышленность. Как могло случиться, что Россия, давшая миру крупнейших деятелей

энергетической техники, оказалась в начале XX в. в области энергетики на одном из последних мест в мире, отставая даже от таких небольших государств, как Австрия, Швеция, Италия, Бельгия?

Объясняется это двумя основными причинами. Во-первых, тем, что вплоть до Великой Октябрьской социалистической революции еще не были изжиты в экономическом строе страны остатки феодальных отношений, и поэтому капиталистическое развитие России было замедленным. В связи с этим расширение сферы применений электричества в России протекало гораздо медленнее, чем в передовых капиталистических странах, и практическая реализация новых технических идей в области электроэнергетики не всегда находила должную поддержку со стороны русских капиталистов.

Во-вторых, вследствие указанного общего экономического отставания страны зарубежные капиталисты смотрели в XIX в. на Россию, как на громадный по емкости рынок для сбыта готовой промышленной продукции и старались всеми силами захватить русский рынок. Они организовывали в России филиалы своих торговых и промышленных предприятий и всемерно препятствовали возникновению и развитию независимой русской промышленности, в частности в области электротехники и теплотехники. Захват русской энергетики иностранным капиталом, в частности германским, происходил при поддержке правящих кругов царской России и фактически вылился в форму полного подчинения этой отрасли техники указке центральных правлений зарубежных крупнокапиталистических концернов, таких, как АЕГ (Всеобщая компания электричества — русский филиал немецкой фирмы AEG — Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft), Сименс и Шуккерт, Сименс и Гальске, Вестингауз, Эриксон, Бельгийское анонимное общество и др.

Вследствие этих обстоятельств иностранцы оказались строителями и владельцами первых русских электростанций общественного пользования (т. е. станций, продававших электрическую энергию потребителям); им принадлежали почти все предприятия городского электротранспорта, ими же были построены и эксплуатировались различные заводы, изготовлявшие электроизделия и энергооборудование. Путь в практику для новых идей русских электротехников лежал через промышленность, принадлежавшую в значительной ее части иностранцам. Последние же,

были заинтересованы в том, чтобы в первую очередь у себя за рубежом внедрить новые технические идеи и лишь тогда применять их в России, когда они по существу дела не будут отличаться новизной.

Состояние электроэнергетики дореволюционной России

Энерговооруженность дореволюционной России можно кратко характеризовать следующими основными показателями, относящимся к области электрификации. Суммарная установленная мощность на всех электростанциях страны составила в 1913 г. примерно 1,1 млн. квт (меньше мощности одной Волжской ГЭС имени В. И. Ленина), а выработка электроэнергии составила около 2 млрд. квт · ч, или 14 квт · ч на душу населения. Выработка электроэнергии в том же году на душу населения в США была примерно в 20, а в Германии — в 3,5 раза больше. По выработке электрической энергии Россия занимала 15-е место среди других стран. В электрификации промышленного производства господствовал почти исключительно групповой привод. Лишь 15,1% электроэнергии вырабатывалось на станциях общего пользования, а остальная доля энергии — на заводских станциях; $\frac{3}{4}$ всех двигателей в промышленности, в том числе и на электростанциях, составляли паровые машины. Наиболее распространенным двигателем внутреннего сгорания был калоризаторный двигатель низкого сжатия, или, как его тогда называли, «нефтянка». Средняя мощность двигателя в промышленности составляла 60 л. с., а на электростанциях — 360 л. с. Применявшиеся котлы имели низкое давление (8—14 ат) и ручную топку.

Котлы характеризовались следующими максимальными показателями: температура перегрева 300—350° С, сьем пара — около 25 кг/м², поверхность нагрева 300—400 м² (только на 1-й МГЭС был установлен котел с поверхностью нагрева 750 м²), к. п. д. котлов — не выше 65—70%. Только два турбогенератора (на 1-й МГЭС) имели мощность по 10 тыс. квт, в остальных случаях — не выше 5 тыс. квт. Средний коэффициент использования установленной мощности составлял около 1920 ч. Удельный расход топлива на 1 квт · ч на станциях общего пользования составлял 1,15 кг. Самой крупной в России электростанцией была Московская станция «Общества 1886 г.» (1-я МГЭС), мощность которой составляла 57 тыс. квт.

В развитии электрификации дореволюционной России можно отметить следующие характерные особенности:

1. Наличие большого числа изолированно работавших электростанций небольшой мощности. Так, в Петрограде в последние годы перед революцией действовало свыше 100 электростанций, большая часть которых представляла собой карликовые блок-станции с самыми разнообразными параметрами. Четыре крупнейшие электростанции Петрограда вырабатывали постоянный и однофазный и трехфазный переменные токи напряжением 2; 3,6 и 6,6 кв с частотами 50; 42,5 и 25 гц. Сети этих станций переплетались в одних и тех же районах города, но соединиться друг с другом не могли.

2. На тепловых электростанциях сжигалось только дальнопривозное высококалорийное топливо (исключение представляла построенная перед самой войной 1914—1918 гг. подмосковная станция «Электропередача», работавшая на торфе). Иностранцы — владельцы электростанций в западных и северо-западных районах страны пользовались почти исключительно импортным минеральным топливом: так, значительный импорт силезского каменного угля из Германии производили электрические станции Привислянского края; электростанции Петербурга и Прибалтики работали на кардиффском угле (вследствие порочной железнодорожной тарифной политики русского правительства уголь выгоднее было ввозить из Англии, чем доставлять из богатейшего Донецкого бассейна).

3. Чрезвычайно малое использование водных ресурсов. По запасам водных ресурсов наша страна занимает 2-е место в мире после Китая. Но в дореволюционной России не существовало ни одной крупной гидроэлектростанции, а суммарная мощность всех гидроэлектростанций (их было больше 70) составляла несколько более 8 тыс. квт.

4. Почти все энергохозяйство страны было сосредоточено в крупнейших промышленных центрах (Петербург, Прибалтика, Москва, Баку, Донбасс).

Столь слабому развитию энергетики страны соответствовала не менее слабая степень развития электротехнической и энергомашиностроительной отраслей промышленности.

Состояние электропромышленности в России

Некоторые электротехнические производства в России возникли еще в середине XIX в., как, например, производство проводов, фарфоровых изоляторов и других изделий, необходимых для устройства телеграфов и электрических минных установок. Как уже указывалось, в 40-х годах XIX в. Б. С. Якоби в мастерских, учрежденных Инженерным ведомством, организовал производство магнитоэлектрических генераторов, соединитель-

ных приборов и других принадлежностей. Изготавливалось в России и гальванотехническое оборудование, были мастерские для ремонта телеграфных аппаратов. Однако все эти производства, кроме кабельного и изоляторного, носили полукустарный характер и были невелики по объему. Только с конца 70-х, а особенно в 90-х годах прошлого века в России создаются предприятия индустриального типа для производства различных электроизделий. Так, в конце 70-х годов начинают работать кабельные заводы в Москве, Петербурге, телеграфный завод в Петербурге (б. Гейслера); в 80-х годах — электромеханический завод в Риге (ныне ВЭФ), фарфоровый завод в г. Славянске (ныне имени Артема), кабельный цех в Кольчугине; в 90-х годах — электромеханические заводы «Динамо» в Москве, «Дюфлон и Константинович» в Петербурге (ныне завод «Электрик»), завод электроугли в Куднове, аккумуляторные заводы в Петербурге, аппаратный завод б. Эриксона в Петербурге (ныне «Красная заря») и др. Наиболее крупные заводы возникли в России после 1900 г.: электромашиностроительный завод б. Сименса (сейчас это один из цехов завода «Электросила») и аппаратостроительный (ныне завод «Электроаппарат»); электротехнический завод в Харькове (ныне ХЭМЗ, построен в 1915 г. на базе частично эвакуированного во время войны Рижского завода); изоляторный завод в Москве (ныне «Изолятор»); радиотелеграфный завод Морского ведомства и радиотелеграфный завод Русского общества беспроволочной телеграфии и телефонии в Петербурге и др.

Большая часть указанных заводов была построена на иностранных капиталы: примерно 70% всех капиталовложений в русскую электропромышленность сделали иностранные предприниматели; среди них главное место занимали германские капиталисты, которым принадлежало большое число предприятий с выпуском более половины всей русской электротехнической продукции (АЕГ и Сименс).

Особенностью работы этих заводов, принадлежавших иностранным фирмам, было то, что они пользовались готовой технической документацией, разработанной за границей для нужд соответствующего зарубежного базисного завода данной фирмы: разработка новых типов изделий на русских заводах не велась. Из-за границы ввозилось много полуфабрикатов, материалов и готовых наиболее сложных деталей. Заводы в России по существу были превращены в сборочные мастерские изделий из импортированного (в своем большинстве) полуфабриката, а их конторы — в аппарат для распространения готовых импортных изделий. Такому положению много способствовала таможенная политика русского правительства, выразившаяся в установлении невысоких ввозных пошлин на полуфабрикаты.

На заводах АЕГ и Сименса в России руководящими инженерами были иностранцы; громадное большинство квалифицированного цехового персонала тоже было привезено из-за границы. В области электромашиностроения и электроаппаратостроения ключевые позиции занимали немецкие фирмы, в области производства средств проводной связи — шведские фирмы; в области предметов радиосвязи вес имел англо-итальянский капитал (радиокомпания Маркони).

К 1913 г. лишь по кабельным изделиям и аккумуляторам внутренний спрос удовлетворялся на 95% продукцией заводов, находившихся в России. Другие изделия электротехнического производства поступали преимущественно за счет импорта. Электротехнических машин производилось в России не более 40% общей потребности, электрических ламп — около 10%, электронизмерительных приборов и счетчиков — около 7%.

В дореволюционное время предприятия электропромышленности

были сконцентрированы в трех пунктах страны: Петербурге, Москве и Прибалтике (Рига, Таллин). Старейшими русскими предприятиями, на которых велось производство электроизделий, являются Московский завод «Электропривод», возникший в 1795 г., и фарфоровый завод «Пролетарий» в Ленинграде (б. завод братьев Корниловых), основанный в 1835 г.

После первой мировой войны 1914—1918 гг. и гражданской войны годовой выпуск изделий электропромышленности сократился более чем в 4 раза, причем особенно сократился выпуск петроградской группы заводов (в связи с чрезвычайными трудностями снабжения этих заводов электроэнергией и материалами) и Харьковского завода (вследствие гражданской войны на Украине в период 1918—1920 гг.).

Естественно, что в период войны 1914—1918 гг. оборудование всех заводов электротехнической промышленности подверглось сильному износу при очень малой замене, а сама технология могла быть усовершенствована лишь в ограниченной мере, так как все эти заводы должны были вести техническую разработку и производить выпуск многих изделий, ранее никогда в России не производившихся.

Производство энергетического оборудования до Великой Октябрьской социалистической революции

Собственное производство паровых котлов и паровых машин возникло в России еще в первой половине XIX в.; масштаб его значительно возрос во второй половине века, когда страна переживала подъем капиталистического производства. Развитие железнодорожного строительства и значительный рост речного парового флота потребовали создания отечественных паровозов, строительства пароходов и т. п. Тепловые двигатели (паровые и двигатели внутреннего сгорания), а также котлы, арматура и гарнитура котельных установок начинают изготавливаться на многих машиностроительных заводах, специализированных же заводов исключительно для производства энергетического оборудования не было. В выпуске продукции некоторых заводов удельный вес паровых двигателей и котлов был достаточно большим, как, например, на паровозостроительных заводах, на Путиловском заводе в Петербурге, на Коломенском машиностроительном заводе под Москвой, на заводе бр. Барн в Москве, на Сорновском заводе, на машиностроительном заводе б. Фицнер и Гампер в Сосновицах (Привислянский край) и др. На всех этих заводах строились крупные паросиловые агрегаты; кроме того, на заводах общего машиностроения изготавливались паровые котлы с небольшой паропроизводительностью (до 10 т/ч) и небольшие паровые машины. Производство локомотивов велось на нескольких заводах, из которых главнейшим был Людиновский завод в Калужской губернии.

Строительство двигателей внутреннего сгорания велось также на многих заводах, но главнейшими предприятиями в этой области были завод бр. Нобель в Петербурге (впоследствии завод «Русский дизель»), Сорновский, Путиловский и Коломенский заводы.

Паровые турбины начали строиться в Петербурге на Металлическом заводе в 1906 г., но масштаб этого производства был незначителен, за первое десятилетие было изготовлено 26 паровых турбин общей мощностью 9 000 квт. Самый крупный агрегат, выпущенный за эти годы, имел мощность 1 250 квт. Применение паровых турбин началось в 1890 г., когда была пущена в эксплуатацию первая турбина вспомогательных нужд на станции, расположенной на р. Мойке в Петербурге; это была паровая турбина Парсона мощностью 150 квт. Не-

которое время внедрение паровых турбин задерживалось вследствие применения двигателей внутреннего сгорания, которые были более экономичными в установках малой мощности. Однако некоторые дальновидные предприниматели, учитывая западноевропейский опыт внедрения паровых турбин как двигателей электростанций, пытались организовать их производство в России.

В 1904 г. акционеры Петербургского металлического завода приобрели у французского ученого О. Рато право на постройку турбин его системы. Первая турбина мощностью 200 кВт была выпущена Металлическим заводом в 1907 г. и установлена на самом заводе. В следующем году были построены паротурбинные установки такой же мощности для патронного и гильзового военных заводов.

Позднее Металлический завод перешел на производство турбин системы Всеобщей компании электричества. В 1918 г. весь выпуск турбин составил в сумме мощность 8967 кВт; таким образом, в дореволюционной России производства турбин по существу не было. Отдельные турбины, строившиеся для установки на военных судах, также выполнялись по лицензиям зарубежных фирм.

Другой тип энергетического оборудования — гидравлические турбины — также почти совершенно не производился; строились только отдельные турбины очень малой мощности. Таким образом, в дореволюционной России гидротурбостроение в целом не имело заметного удельного веса в общей продукции русских машиностроительных заводов.

План ГОЭЛРО Великая Октябрьская социалистическая революция открыла новую страницу всемирной истории. В России была установлена высшая на данном этапе исторического развития форма политической организации — Советская власть. Но Коммунистическая партия и В. И. Ленин неоднократно указывали, что мало установить народную власть, победить в политическом отношении, нужно было победить и экономически, иначе мировой империализм, собрав свои силы после разрушительной мировой войны и интервенции в России, задушил бы молодую Советскую республику.

Широко известно то значение, которое придавал В. И. Ленин электрификации советской страны, считая, что электрификация должна явиться той базой, на которой будет построено будущее индустриальное могущество социалистического государства.

Уже в декабре 1917 и начале 1918 гг. были национализированы крупнейшие электростанции и электротехнические заводы. В декабре 1917 г. В. И. Ленин дал указание о строительстве Шатурской ГРЭС, вскоре был решен вопрос о строительстве Волховской ГЭС, в марте 1919 г. началось сооружение Каширской ГРЭС. А уже в июле 1920 г. временная Шатурская электростанция мощностью 5 тыс. кВт вступила в строй.

23 января 1920 г. В. И. Ленин направил Г. М. Кржижановскому письмо, в котором была сформулирована необходимость создания государственного научного плана развития народного хозяйства России, развития электрификации. Проект такого плана «...надо дать сейчас, — писал Ленин, — чтобы наглядно, популярно, для массы увлечь ясной и яркой (вполне научной в основе) перспективой: за работу-де, и в 10—20 лет мы Россию всю, и промышленную и земледельческую, сделаем электрической...»¹. Так В. И. Лениным был сформулирован важнейший принцип развития социалистической электрификации — плановость. В этом принципе находил свое отражение объективный закон планомерного развития народного хозяйства в условиях социализма, закон, действие которого предвидели еще К. Маркс и Ф. Энгельс. Начиная с первого плана электрификации, советская энергетика всегда развивалась только на основе народнохозяйственных планов.

В феврале 1920 г. по предложению В. И. Ленина ВЦИК принял историческое решение о разработке плана электрификации страны. Для реализации этого решения во второй половине февраля была образована Государственная комиссия по электрификации России, или, как ее сокращенно стали называть, ГОЭЛРО.

Над планом электрификации России работали около 200 крупнейших специалистов в области энергетики, таких, как проф. Г. О. Графтио, Е. Я. Шульгин, А. А. Горев, И. Г. Александров, Л. К. Рамзин, К. А. Круг, М. А. Шателен, Г. Д. Дубеллир, Б. И. Угримов и А. И. Угримов и др. Председателем комиссии ГОЭЛРО был утвержден Г. М. Кржижановский.

Основные элементы и этапы осуществления единого общехозяйственного плана были указаны в резолюции IX съезда партии (март—апрель 1920 г.):

разработка плана электрификации народного хозяйства и осуществление программы-минимум электрификации на основе использования существующих электрических станций, а также части строящихся в первоочередном порядке районных центральных;

постройка основных районных электрических станций первой очереди и основных линий электропередачи;

сооружение районных станций следующей очереди, дальнейшее развитие электрических сетей и последова-

¹ В. И. Ленин, Соч., изд. 4-е, т. 35, стр. 370.

тельная электрификация важнейших производственных процессов;

электрификация промышленности, транспорта и земледелия.

В обстановке гражданской войны, хозяйственной разрухи и голода, в борьбе с маловерами и саботажниками, рождался первый план развития народного хозяйства нашей страны. В кратчайший срок — в течение 10 мес. — план для всей страны, разделенной на восемь экономических районов, был создан.

VIII Всероссийский съезд Советов в декабре 1920 г. по докладу Г. М. Кржижановского принял постановление, одобряющее разработку плана ГОЭЛРО, оценив его как «первый шаг великого хозяйственного начинания».

В. И. Ленин, явившийся инициатором и вдохновителем разработки плана ГОЭЛРО, проявлял величайший интерес ко всем деталям плана и оказывал повседневную помощь Комиссии во время ее работы. Выступая на VIII съезде Советов, Ленин охарактеризовал план ГОЭЛРО как вторую программу партии, как великий хозяйственный план создания экономической базы, необходимой для коммунизма. «Такой базой, — говорил Ленин, — является только электричество. *Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны*»¹.

В этой знаменитой ленинской формуле нашел свое отражение закон соответствия производственных отношений состоянию производительных сил. Из этой формулы следует, что коммунизм должен представлять собой органическое сочетание самой совершенной техники и наиболее высокой политической организации общества.

Что же представлял собой план ГОЭЛРО?

Центральная идея плана была сформулирована так: «Выровнять фронт нашей экономики в уровень с достижениями нашего политического уклада»². Во введении к плану говорилось о том, что составить проект электрификации России — это «...означает дать красную руководящую нить для всей созидательной хозяйственной деятельности, построить основные леса для реализации единого государственного плана народного хозяйства»³.

¹ В. И. Ленин, Соч., изд. 4-е, т. 31, стр. 484.

² План электрификации РСФСР. Доклад VIII съезду Советов Государственной комиссии по электрификации России, Госполитиздат, 1955, стр. 32.

³ Там же, стр. 36.

План ГОЭЛРО не был планом строительства и реконструкции одних лишь электростанций. План выдвигал программу широкого социалистического хозяйственного развития в области промышленности, транспорта и сельского хозяйства. Он предусматривал не только восстановление разрушенного народного хозяйства, но и увеличение в исторически кратчайшие сроки объема промышленной продукции страны почти вдвое по сравнению с довоенным уровнем и более чем в 13—14 раз по сравнению с уровнем 1920 г. Для реализации плана ГОЭЛРО были намечены два срока: минимум — 10 лет и максимум — 15 лет.

В плане ГОЭЛРО были четко сформулированы основные принципы развития социалистического народного хозяйства:

1. Техническое перевооружение всех отраслей народного хозяйства на базе использования электрической энергии и на этой основе быстрый рост производительности труда.

2. Обеспечение преимущественного роста тяжелой индустрии — основы развития всего народного хозяйства и укрепления обороноспособности страны.

3. Достижение опережающих темпов роста электроэнергетического хозяйства по сравнению с темпами роста промышленного производства.

Однако центральную, решающую часть плана ГОЭЛРО составлял план электростроительства. Первой частью плана электростроительства являлась так называемая программа «А», намечавшая рационализацию и объединение для совместной работы существующих электростанций в Ленинграде, в районе Москвы, в Донбассе, на Урале и в других местах.

Программа «Б» намечала сооружение 20 тепловых электростанций с общей установленной мощностью 1110 тыс. кВт и 10 гидроэлектростанций с общей мощностью 640 тыс. кВт. Таким образом, план предусматривал сооружение 30 районных электростанций с установленной мощностью 1750 тыс. кВт и выработкой электроэнергии 8,8 млрд. кВт·ч.

В плане ГОЭЛРО были четко изложены основные принципы электростроительства в нашей стране, смысл которых сводится к следующему:

1. Строительство крупных современных электрических станций, которые обеспечили бы электроснабжение целых районов (районные станции).

2. Широкое использование на электрических станциях

местных топливных ресурсов для того, чтобы сократить излишние дорогостоящие перевозки перегруженного и без того транспорта и создать энергетическую базу для развития хозяйства в районах, не имеющих высококачественного топлива.

3. Широкое использование водных ресурсов путем строительства мощных гидроэлектрических станций, обеспечивающих комплексное использование гидроресурсов для нужд энергетики, транспорта и ирригации.

4. Строительство линий электропередачи высокого напряжения, создание энергетических систем, объединяющих энергетическое хозяйство целого района и нескольких районов между собой, а затем создание на основе этих межрайонных систем единой электроэнергетической системы всей страны.

5. Рациональное размещение электроэнергетического хозяйства как мощного фактора равномерного распределения производительных сил по территории всей страны. Наряду с укреплением электроэнергетической базы старых промышленных районов сооружение электростанций на бывших окраинах страны, в ранее отсталых национальных районах, создание новых индустриальных центров.

Осуществление плана ГОЭЛРО протекало в чрезвычайно трудных условиях. Внешние и внутренние враги социалистического государства обрушили потоки лжи и клеветы на советских энергетиков, пытались подорвать веру в реальность плана. Хозяйственная разруха долго еще мешала широкому развороту строительства и заставляла порой временно свертывать начатое уже строительство (Свирская ГЭС). Не хватало самых элементарных инструментов и самых необходимых материалов: отверстия в деревянных опорах прожигались раскаленными прутьями, так как не хватало сверл, не было петель для подвешивания дверей и т. п.

Но беспримерен был тот энтузиазм, который охватил Комиссию ГОЭЛРО и тех, кто начал претворять в жизнь народнохозяйственный план. Составители плана ГОЭЛРО отмечали, что за ними придут другие люди, которые в более спокойное время, с более совершенным запасом сил и средств смогут продолжить их труд, исправить их ошибки и развернуть широкое энергетическое строительство в нашей стране.

В 1922 г. были пущены Каширская ГРЭС и электростанция «Красный Октябрь» (б. «Уткина-заводь»)

в Ленинграде. В 1924 г. вступила в строй Кизеловская, в 1925 г. — Горьковская и Шатурская ГРЭС. В декабре 1926 г. на торжественном открытии Волховской ГЭС — первенца советского гидростроительства — С. М. Киров сказал: «Отныне седые воды Волхова будут работать на социализм». А 8 ноября 1927 г. на Днепре в скалу «Любовь» была заложена доска, на которой были выгравированы слова: «Днепрострой начат».

Строительство электростанций велось невиданными темпами и развертывалось с необыкновенным размахом. План ГОЭЛРО по всем основным показателям был выполнен в кратчайший из намеченных сроков — в 1931 г. В этом году суммарная установленная мощность электростанций составила 3 972 тыс. кВт, а выработка электроэнергии достигла 10 686 млн. кВт·ч. К конечному сроку (1935 г.) мощность районных электростанций составила 248% намеченной планом ГОЭЛРО. Советский Союз по производству электроэнергии обогнал все страны, за исключением США и Германии, а впоследствии вышел на 2-е место в мире, уступая только США.

Великая Отечественная война, во время которой были разрушены крупнейшие электростанции, отбросила нашу страну по выработке электроэнергии на 6—7 лет назад. Но еще во время войны началось строительство новых электростанций, и вскоре после окончания войны был достигнут, а затем и намного превзойден довоенный уровень.

В 1958 г. установленная мощность на электростанциях СССР составляла около 53 млн. кВт, а выработка электроэнергии достигла 233 млрд. кВт·ч; в 1959 г. выработка электроэнергии возросла до 264 млрд. кВт·ч.

Сопоставление рис. 10-5 и 10-1 показывает, что, во-первых, темпы развития советской энергетики значительно превосходят темпы развития американской, что, во-вторых, развитие не подвергается колебаниям и спадам от кризисов. Спад темпов развития энергетики в СССР, имевший место в период войны 1941—1945 гг., был вызван внешней причиной; следует отметить, что именно этот военный период дал наиболее высокие темпы роста энергетики в США.

В решениях XXI съезда КПСС подчеркивалось, что предстоящее семилетие должно стать решающим этапом в осуществлении сплошной электрификации страны. В течение 7 лет будет введено около 60 млн. кВт новых мощностей, что превышает мощность всех электростанций,

построенных за 41 год Советской власти. Выработка электроэнергии достигнет к 1965 г. 500—520 млрд. кВт.ч в год; за это время будет построено свыше 200 тыс. км линий передач с напряжением 35—500 кв. Предусматривается преимущественное строительство тепловых электростанций мощностью свыше 2 млн. квт на дешевых углях, мазуте и газе, а также высокоэкономичных мощных гидроэлектростанций. Особое внимание уделяется удешевлению и ускорению энергостроительства. Разрабатываемые перспективные планы электрификации страны и развития всего народ-



Рис. 10-5. Производство электроэнергии в СССР (млрд. кВт.ч).
Верхняя кривая — все электростанции, нижняя кривая — гидроэлектростанции.

ного хозяйства на 15—20 лет станут главным стержнем всей программы коммунистического строительства. За 15—20 лет мощность электростанций будет увеличена в 7—8 раз; выработка электроэнергии к 1980 г. должна достигнуть 2 300 млрд. кВт.ч.

Качественные изменения энергетики СССР

Одновременно с быстрыми количественными изменениями проходит процесс качественного изменения электроэнергетического хозяйства СССР. Этот процесс легко представить, если проследить, как реализуются принципы развития электростроительства, сформулированные в плане ГОЭЛРО, и как возникают новые направления этого развития.

1. Строительство крупных районных электростанций. До Великой Отечественной войны самыми мощными электростанциями в нашей стране были Сталиногорская ГРЭС (400 тыс. квт) и Днепроовская ГЭС (560 тыс. квт). В 1957 г. у нас уже работали 12 тепловых

электростанций, мощность каждой из которых превышала 400 тыс. квт (Щекинская, Южно-Уральская, Приднепровская и др.) и будет увеличена еще с введением следующих очередей. Строятся тепловые станции с проектной мощностью до 1 500 тыс. квт. Волжская ГЭС имени В. И. Ленина по установленной мощности (2 300 тыс. квт) является самой крупной электростанцией в мире, а сооружаемые новые крупнейшие гидроэлектростанции будут

иметь еще большие мощности: Сталинградская — 2 530 тыс. квт, Братская — 4 500 тыс. квт и Красноярская — 5 000 тыс. квт.

Яркой иллюстрацией того факта, что в нашей стране пре-



Рис. 10-6. Стоимость 1 квт установленной мощности в зависимости от мощности электростанции.

имущественно строятся крупные электростанции, являются следующие цифры: в 1955 г. 60% всей выработанной на турбинных электростанциях электроэнергии приходилось на долю станций единичной мощностью свыше 100 тыс. квт, 84% мощности гидроэлектростанций и 68% тепловых электростанций, строившихся в конце 1955 г., приходилось на станции мощностью 500 тыс. квт и выше. На 60-е годы планируется сооружение конденсационных электростанций мощностью до 2 000—2 400 тыс. квт.

Об эффективности строительства крупных электростанций можно судить по кривой, приведенной на рис. 10-6, показывающей снижение стоимости 1 квт установленной мощности в зависимости от мощности электростанции.

Большое значение для повышения экономичности современных тепловых электрических станций имеет все расширяющееся применение пара высоких параметров.

2. Использование топливных ресурсов. В настоящее время в стране уже нет той остроты проблемы использования местных топлив, которая имела место в первые годы после революции. Открыты и разрабатываются новые высокоэффективные месторождения угля (Кузбасс, Караганда, Экибастуз, восточносибирские угли и т. д.), изменилась общая энергетическая конъюнктура в нашей стране, значительно развит и усовершенствован железнодорожный транспорт. Но тем не менее доля местных топлив в энергетическом балансе все возрастает. Удельный вес электроэнергии, выработанной на дальнепривозном топливе, сократился в СССР со 100% в 1913 г. до 8,6% в 1955 г., причем освоено сжигание до 60 сортов топлива. Эффективность работы станций на многозольных и влажных топливах очень мало отличается от эффективности станций, работающих на высокосортном топливе, что при меньшей стоимости малоценных топлив дает большой экономический эффект. Успех советских энергетиков в решении этой важной экономической задачи хорошо иллюстрируется тем, например, фактом, что к. п. д. работающей в Подмосковном угольном бассейне Черепетской ГРЭС с турбинами мощностью 150 тыс. кВт составляет 33%, т. е. мало отличается от к. п. д. лучших американских тепловых станций, работающих на высокосортном топливе.

В связи с открытием в последние годы в нашей стране ряда крупных месторождений природного газа встала задача рационального использования этого ценнейшего вида топлива. В частности, возникла необходимость перехода к строительству электростанций с газовыми турбинами.

О том, насколько резко изменяется в настоящее время структура добычи топлива, можно судить по следующим ориентировочным перспективным показателям удельного веса различных топлив:

если в 1956 г. уголь составлял 70% в общем топливном балансе страны, нефть — 23%, газ — 2% и прочие топлива — 5%, то к 1970 г. планируется почти двукратное снижение процента угля в топливном балансе, значительное увеличение процента нефти и более чем десятикратное увеличение процента газа при значительном уменьшении процента прочих видов горючего.

Уже в начале шестой пятилетки многие электростанции были переведены на газ.

Значительно должно возрасти потребление на электростанциях мазута. Весьма перспективной и чрезвычайно важной станет задача комплексного энерготехнического использования топлива, когда энерготехнологические комбинаты наряду с электроэнергией будут выдавать также ценнейшее сырье для химической промышленности.

3. Использование водных ресурсов. Потенциальные запасы гидроэнергии в СССР в средний по водности год превышают 300 млн. кВт, а общая установленная на гидроэлектростанциях мощность в 1957 г. составила немногим более 9 млн. кВт. Поэтому в нашей стране имеются практически неисчерпаемые возможности для развития гидроэлектростроительства. Советские энергетики успешно решили многие сложнейшие проблемы гидроэнергетического строительства, в частности проблемы сооружения электростанций на равнинных реках с мягкими грунтами. Яркими примерами уникальных гидротехнических сооружений являются Свирская ГЭС (автор проекта Г. О. Графтио) и Днепровская ГЭС имени В. И. Ленина (автор проекта И. Г. Александров).

Удельный вес электроэнергии, вырабатываемой на районных гидроэлектрических станциях, составляет около 18%, а в ряде районов (Армянская ССР, Мурманский административно-экономический район) практически вся электроэнергия вырабатывается на гидроэлектростанциях. Характерной особенностью гидроэлектростроительства становится сооружение каскадов гидроэлектрических станций (Волга, Днепр, Раздан, Ангара, Енисей и др.). Сооружаемые каскады гидроэлектростанций будут давать ежегодно по несколько десятков миллиардов киловатт-часов электроэнергии. Например, Волжский каскад будет иметь установленную мощность около 7,5 млн. кВт, а выработку электроэнергии более 35 млрд. кВт·ч. Ангарский каскад при установленной мощности около 14 млн. кВт будет вырабатывать 70 млрд. кВт·ч электроэнергии, в том числе 22 млрд. кВт·ч — на Братской ГЭС.

В предстоящее семилетие будет развернуто строительство высокоэкономичных гидроэлектростанций мощностью до 5–6 млн. кВт с агрегатами по 500 тыс. кВт. Особое внимание при разработке проектов гидроузлов будет обращено на применение сборных железобетонных конструкций заводского изготовления.

4. Строительство линий электропередачи и создание крупных электроэнергети-

ческих систем. В нашей стране непрерывно осуществляется процесс создания укрупненных электроэнергетических систем. До Великой Отечественной войны у нас уже существовали такие крупные объединенные энергосистемы, как Центральная, Южная, Уральская. В Центральную энергосистему входили электростанции Московской, Ярославской, Ивановской, Горьковской, Владимирской, Тульской и Рязанской обл. Уральская энергосистема имела протяженность свыше 1 тыс. км. В 1957 г. на территории СССР действовала 61 энергосистема.

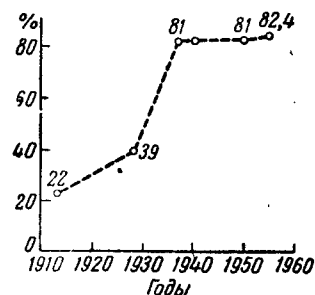


Рис. 10-7. Изменение процента централизации производства электроэнергии.

Кривая, приведенная на рис. 10-7, показывает, что в шестой пятилетке около 83% электроэнергии вырабатывалось на электростанциях, работающих в энергетических системах.

В 1956 г. сооружением линии электропередачи Волжская ГЭС имени В. И. Ленина—Москва напряжением 400 кВ было осуществлено соединение Куйбышевской и Центральной объединенной энергосистем. Сооружение в 1958 г. линии электропередачи Куйбышевская ГЭС—Урал и в 1959 г. линии Сталинградская ГЭС—Москва напряжением 500 кВ, а также линии постоянного тока Сталинградская ГЭС—Донбасс напряжением 800 кВ завершает создание первой очереди Единой энергетической системы европейской части СССР. Эта крупнейшая в мире система с суммарной установленной мощностью свыше 25 млн. кВт охватывает электростанции Юга, Центра и Урала. Так, реально осуществляется мечта составителей плана ГОЭЛРО. И уже вполне реальной становится еще более смелая и заветная мечта: создание единых энергетических систем Западной Сибири и Кавказа с последующим объединением этих и других систем в Единую энергетическую систему Советского Союза.

Известно, что чем больше единичная мощность агрегатов электростанции, тем они экономичнее, тем выше общий к. п. д. станции, тем меньше численность обслуживающего персонала. Однако крупные агрегаты целесообразно применять только в крупных энергетических системах. В системах малой мощности крупные агрегаты применять не-

экономично, так как слишком велика была бы доля резерва (если в энергетической системе мощностью, например, 300 тыс. кВт установить агрегаты по 100 тыс. кВт, то при одном резервном агрегате доля резерва составит свыше 30%). Мощность агрегатов на электростанциях СССР неуклонно росла. Если в 1925 г. были впервые установлены турбины по 10 тыс. кВт, то в 1931 г. вступила в строй турбина 50 тыс. кВт, в 1937 г. — 100 тыс. кВт, в 1952 г. — 150 тыс. кВт и в 1958 г. была изготовлена турбина мощностью 200 тыс. кВт. В течение семилетки будут изготовлены паровые турбины мощностью 300—600 тыс. кВт и гидротурбины мощностью 225—500 тыс. кВт.

5. Рациональное размещение электроэнергетического хозяйства по территории страны. Еще до Великой Отечественной войны Коммунистическая партия и Советское правительство придавали большое значение электрификации бывших окраин и созданию новых промышленных центров, таких, как Магнитогорский комбинат, Кузбасс и др. Правильность этой политики была проверена в годы Отечественной войны, когда Урал и Западная Сибирь стали настоящей кузницей оружия, кузницей победы.

В послевоенный период электростроительство охватило еще более удаленные и более обширные территории страны. Достаточно вспомнить о строительстве гидроэлектростанций на рр. Ниве и Днепре, Куре и Волге, Днестре и Сыр-Дарье, Иртыше и Ангаре, Каме и Енисее.

Остатки в экономическом отношении окраинные районы России превратились за годы Советской власти в цветущие социалистические республики с довольно развитой электроэнергетикой. Удельный вес выработки электроэнергии Казахской и среднеазиатских республик возрос с 0,4% в 1913 г. до 6,3% в 1955 г. Насколько далеко ушли в своем промышленном развитии советские республики от соседних зарубежных капиталистических стран, можно судить по следующему примеру: упомянутые Казахская и среднеазиатские республики при населении 21 млн. чел. выработали в 1955 г. 11 млрд. кВт·ч электроэнергии, а Иран и Афганистан при населении 34 млн. чел. выработали менее 0,5 млрд. кВт·ч.

Электрические сети наших республик нередко имеют междуреспубликанские линии электропередачи, позволяющие производить обмен электроэнергией и оказывать помощь друг другу в электроснабжении. В 1954—1955 г. об-

ший взаимный обмен электроэнергией составил величину около 2 млрд. кВт·ч. Эта цифра соизмерима с межгосударственным обменом электроэнергией в европейских капиталистических странах (около 5 млрд. кВт·ч).

Важной особенностью электрификации СССР является развитие теплофикации. Эта особенность не была отражена в плане ГОЭЛРО, так как тогда эта проблема еще не возникала. Первый опыт комбинированного производства электрической и тепловой энергии в нашей стране был осуществлен в 1924 г. (электростанция № 3 в Ленинграде). Затем теплофикационные установки были осуществлены на ряде заводов и фабрик Москвы и Ленинграда. Действительно широкая теплофикация крупных городов СССР началась после 1931 г., когда этот вопрос явился предметом обсуждения Пленума ЦК ВКП(б). В постановлении Пленума указывалось: «ЦК считает, что в дальнейшем плане электрификации страны должна быть во всем объеме учтена задача развернутого строительства мощных теплоэлектроцентралей, в первую очередь в крупных индустриальных центрах как старых (Москва, Ленинград, Харьков и др.), так и новых (Челябинск, Сталинград и др.)»¹. Эффективность строительства теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) очень велика, так как переход от местных котельных к централизованному теплоснабжению от ТЭЦ дает экономию топлива (за счет более высокого к. п. д. котельных ТЭЦ) до 0,3 Мккал на каждую отпущенную мегакалорию тепла. В 1956 г. мощность районных теплоэлектроцентралей в нашей стране превысила 6 млн. кВт.

При характеристике качественных изменений в энергетике Советского Союза следует указать также работы по автоматизации производственных процессов на электростанциях, применение дистанционного управления оборудованием, телемеханизации контроля и управления на станциях и в системах. Достаточно сказать, что в СССР полностью автоматизированы практически все гидроэлектростанции, а к началу 1957 г. управление 46 гидроэлектростанциями было телемеханизировано.

На основе развернутого электростроительства в Советском Союзе происходят коренные изменения в промышленности, транспорте, сельском хозяйстве и в быту. Техниче-

¹ КПСС в резолюциях и решениях съездов, конференций и пленумов ЦК, ч. III, стр. 120, 1954.

ский прогресс на базе электрификации захватывает все новые области производственной деятельности, неизмеримо повышает производительность труда и существенно облегчает человеческий труд.

О росте электровооруженности труда, т. е. о количестве потребленной в промышленности электроэнергии, приходящейся в среднем на одного рабочего, можно судить по рис. 10-8, где электровооруженность труда в 1913 г.

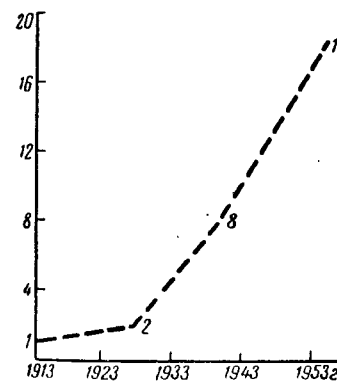


Рис. 10-8. Рост электровооруженности труда в СССР.

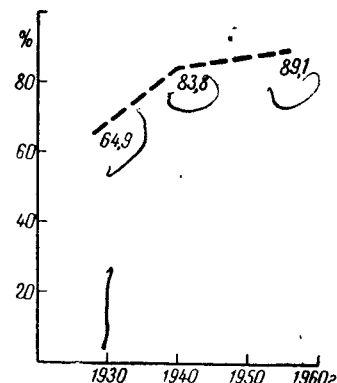


Рис. 10-9. Изменение коэффициента электрификации силовых процессов (по мощности).

принята за единицу. На рис. 10-9 показано изменение коэффициента электрификации силовых процессов промышленности, который вычислен как отношение мощности электродвигателей к мощности всех двигателей, приводящих рабочие машины. Основанная на электрификации автоматизация производственных процессов идет настолько глубоко, что позволяет в настоящее время создавать не только автоматические станки, но и автоматические линии и даже автоматические заводы. Заводы и фабрики начинают превращаться, как писал В. И. Ленин, в чистые и светлые, достойные человеческого лабораторий.

Новые горизонты открываются в области электрификации в связи с использованием ядерной энергии. В 1954 г. в Советском Союзе была построена первая в мире промышленная атомная электростанция мощностью 5 тыс. кВт,

а в 1958 г. вступила в строй первая очередь (100 тыс. квт) новой крупной атомной электростанции. В энергосистемах различных зон и экономических районах страны, главным образом в местах, не богатых энергетическими ресурсами, строятся другие атомные электростанции.

Следует отметить, что электростанции Советского Союза в настоящее время обеспечиваются оборудованием отечественного производства (импорт большей части оборудования прекратился уже в начале 30-х годов). Наши электротехническая и энергомашиностроительная промышленности способны изготовлять агрегаты и другое оборудование в достаточном количестве и на уровне современной мировой техники.

10-4. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ В ЗАРУБЕЖНЫХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ СТРАНАХ

На VIII Всероссийском съезде Советов В. И. Ленин сказал пророческие слова: «...если Россия покроется густой сетью электрических станций и мощных технических сооружений, то наше коммунистическое хозяйственное строительство станет образцом для грядущей социалистической Европы и Азии»¹. В наше время уже ряд стран Европы и Азии твердо вступил на путь социалистического строительства. Эти страны, учитывая свои особенности, широко применяют опыт хозяйственного строительства, накопленный в СССР. В основу развития своей экономики они положили ленинские принципы электрификации.

В таблице приведены цифры, характеризующие быстрый рост выработки электроэнергии в социалистических странах (млрд. квт·ч).

Страны	Годы					
	1946	1950	1953	1954	1955	1956
ГДР	11,5	19,6	24,2	26,0	28,7	31,2
Польша	5,7	9,4	13,7	15,5	17,8	19,5
Чехословакия	5,6	9,3	12,4	13,6	15,0	16,6
Китай	3,7*	5,8	9,3	11,0	12,3	15,5
Венгрия	1,3	3,0	4,6	4,8	5,4	5,2
Румыния	0,7	2,1	3,4	3,8	4,3	4,9
Болгария	0,4	0,8	1,6	1,8	2,1	2,4

* Для 1947 г.

¹ В. И. Ленин, Соч., изд. 4-е, т. 31, стр. 486.

Приведенные цифры показывают, что ежегодный прирост выработки электроэнергии в социалистических странах резко превосходит прирост в капиталистических странах, имея значение 10% в таких промышленных странах, как ГДР и Чехословакия, и превышающий 15% в аграрных странах.

До второй мировой войны теперешние страны народной демократии находились на разных этапах хозяйственного развития. Если ГДР и Чехословакия имели сравнительно высокоразвитую индустрию, то, например, Китай, Румыния, Албания представляли собой аграрные страны с ничтожным развитием промышленности и электрификации. Война принесла многочисленные разрушения, и этим странам приходилось, так же как в 20-х годах Советскому Союзу, сначала восстанавливать народное хозяйство, а затем развертывать широкий фронт работ по развитию промышленного производства.

Значительной долей успеха в быстром развитии народного хозяйства эти страны обязаны братской помощи Советского Союза, который оказывает эту помощь материалами, оборудованием и кадрами высококвалифицированных специалистов.

На 1 января 1957 г. в Китае работало 16 электростанций, построенных по советским проектам и на советском оборудовании; в Румынии таких станций было 10, а в Польше и Болгарии — по 4 и т. д. Всего в странах народной демократии было построено 37 электростанций, и в 1957 г. велись строительно-монтажные работы на 47 электростанциях. Советские специалисты оказывают также помощь указанным странам в проектировании и сооружении ряда линий электропередачи и нескольких подстанций.

Страны народной демократии быстро восстановили разрушенные электростанции и в дальнейшем процессе электрификации использовали новейшие достижения современной техники и возможности социалистического планирования и строительства. Например, в Чехословакии, несмотря на сравнительно развитое энергохозяйство, до войны не было единой электрической системы, очень слабо были освоены гидроресурсы, а использование установленной мощности составляло всего 2200 ч в год. В последние 10 лет в Чехословакии были построены крупные современные тепловые и гидравлические электростанции и создана

разветвленная сеть линий электропередачи напряжением 110 и 220 кв.

Прогресс электрификации ярко виден на примере Польши. Уже в 1949 г. в стране были восстановлены все разрушенные во время войны электростанции, а за годы шестилетки (1950—1955 г.) были построены такие крупные электростанции, как Явожно (300 тыс. квт), ТЭЦ Меховице (220 тыс. квт) и др. Созданы основы единой государственной энергетической системы напряжением 220 кв.

Быстро наращивает темпы электрификации Народный Китай. До народной революции (1949 г.) энергохозяйство Китая находилось в полуразрушенном запущенном состоянии. В 1947 г. в этой огромной стране, занимающей по энергетическим ресурсам первое место в мире, производилось всего 3,7 млрд. квт·ч электроэнергии. После 1949 г. начались быстрое восстановление и реконструкция электрохозяйства. В 1957 г. выработка электроэнергии приблизилась уже к 16 млрд. квт·ч. Началось строительство 76 тепловых и 16 гидравлических станций, создается 10 энергетических систем. Электропромышленность Китая освоила производство крупных машин; в частности, на Гуаньтинской ГЭС установлены изготовленные в Китае гидрогенераторы мощностью по 10 тыс. квт. С апреля 1957 г. в ущелье Саньмыньбай на р. Хуанхэ ведется строительство крупнейшей в Китае гидроэлектростанции мощностью свыше 1 млн. квт. Новый гидроузел устранит угрозу наводнений для 80 млн. чел., проживающих в районе нижнего течения р. Хуанхэ, позволит оросить около 3 млн. га пахотных земель и будет ежегодно вырабатывать 6 млрд. квт·ч электроэнергии. В Китае уже создаются смелые проекты крупных энергетических систем и каскадов гидроэлектростанций. По одному из проектов предусматривается сооружение на р. Хуанхэ и ее притоках 46 плотин; суммарная мощность электростанций по этому проекту должна составить 23 млн. квт с выработкой 110 млрд. квт·ч электроэнергии.

В социалистических странах осуществляется и развивается дальше широкое экономическое сотрудничество на основе последовательного осуществления международного социалистического разделения труда, рациональной специализации и кооперирования производства. Расширяются импорт и экспорт электроэнергии путем осуществления связи электроэнергетических систем социалистических стран. Так, энергетическая система ГДР связана с энерге-

тическими системами Польши и Чехословакии, электростанции Румынии связаны с энергосистемой Болгарии.

Дальнейшее развитие энергетики социалистических стран позволит поставить вопрос об объединении энергетических систем всех этих стран, которое принесет большие выгоды для их экономики и явится новым стимулом в развитии их народного хозяйства.

Таковы важнейшие особенности развития электрификации в социалистических странах.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

РАЗВИТИЕ ПЕРВИЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В СВЯЗИ С ЭЛЕКТРИФИКАЦИЕЙ

11-1. РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Общие условия, в которых складывалась современная комплексная энергетика, создавшая стимул для быстрого роста и совершенствования первичной энергетики, были изложены в гл. 6. Рассмотрим теперь, по каким путям шла и совершенствовалась первичная энергетика — теплоэнергетика и гидроэнергетика — под влиянием и воздействием электроэнергетики. Другие виды первичной энергетики, например ветроэнергетика, гелиоэнергетика и т. п., весьма ограниченные по масштабу своего применения, нами не затрагиваются. Развитие теплоэнергетики целесообразно проследить по ее основным отраслям: котлостроению и двигателестроению. Поскольку применение паровых машин и двигателей внутреннего сгорания на электрических станциях имело место только в начальный период, в настоящей главе излагается технический прогресс стационарных котлоагрегатов и паровых турбин. Газовые турбины, не получившие еще широкого применения в качестве двигателей электрических станций, рассмотрены кратко в разделе о паровых турбинах. Развитие гидроэнергетики изложено отдельно, причем показан прогресс гидравлических турбин и гидросиловых установок в целом.

Развитие котлостроения

Концентрация производства энергии, начавшаяся с переходом к электрификации, практически оказалась бы неосуществимой на основе старой первичной энергетики «доэлектрического» периода. Уже в конце XIX в. эта старая техника мало удовлетворяла новым требованиям,

главной особенностью которых была необходимость удовлетворять значительно выросшую потребность промышленности в энергии. Если в конце XIX в. крупные предприятия потребляли мощность в пределах 500—1500 л. с., то в начале XX в. предстояло обеспечить для некоторых заводов мощность уже примерно 30 тыс. л. с. Для решения этой задачи в условиях старой первичной теплоэнергетики нужно было бы установить более десятка мощных паровых машин и около сотни паровых котлов.

Если поставить себе задачу обеспечить тем же теплотехническим оборудованием конца XIX в. современную тепловую электростанцию мощностью 600 000 квт, то решение ее являло бы еще более разительную картину: потребовались бы более 1700 паровых котлов и грандиозные площади для их расстановки; число паровых машин было бы равно 240. Таким образом, здесь совершенно отчетливо проявилось следующее противоречие: теплоэнергетика тормозила развитие электростанций, а поэтому рост станций решительным образом стимулировал развитие теплоэнергетики. В настоящее время мощность 600 тыс. квт может быть обеспечена установкой трех котлов и трех турбин (а в недалеком будущем — двух котлов и двух турбин). Это значит, что за первую половину XX в. под постоянным влиянием электрификации теплоэнергетика прошла большой и славный путь.

Влияние объективного хода развития электрификации на теплоэнергетику было хорошо оценено акад. М. В. Кирпичевым. Еще в 1916 г. он писал: «Непосредственной причиной совершенствования как турбины, так и котла было проникновение электричества во все отрасли промышленности и общественной жизни и, как следствие этого, — появление крупных электрических станций». Что касается путей совершенствования паровых котлов, то, по мнению М. В. Кирпичева, здесь следовало прежде всего отказаться от старых методов использования неточных и неисследованных значений коэффициентов теплопередачи K . Он писал: «Типы котлов так разнообразны, что пользоваться величиной K , полученной при испытании одного котла, для расчетов другой конструкции нельзя». В качестве нового метода, способного решить возникшую задачу, М. В. Кирпичев предлагал исследование элементов котла, так как «...типов дымоходов сравнительно немного: поперечные и продольные ходы водотрубных котлов, боковые ходы английских котлов; из комбинации таких ходов состоит

любая конструкция котла. Поэтому определение отдельных дымоходов имеет громадное значение, давая ценный материал для расчета». Эти идеи легли в основу создания научной школы теплового моделирования.

Необходимость разработки научных методов точного теплового расчета проявилась в трудах ряда ученых, посвященных вопросу о теплообмене в паровых котлах. Так, например, в исследованиях немецкого ученого Ф. Мюнцингера сложный комплекс факторов, влияющих на теплопередачу в паровых котлах и установленных многочисленными испытаниями, был представлен для использования работникам котлостроения в виде ряда номограмм, дающих значение коэффициента теплоотдачи в зависимости от ряда конкретных условий.

Другие ученые изучали частные случаи теплообмена с целью изыскания общих для всех случаев закономерностей. В этой области большое значение имели исследования немецких ученых В. Нуссельта, Л. Прандтля и Гребера, заложивших основы для развития учения о физическом подобии тепловых процессов.

Подобно тому как практика построения и эксплуатации паровой машины имела громадное значение для становления термодинамики, практика построения паровых котлов в условиях жесткой необходимости перехода к высокой паропроизводительности, потребной в условиях электрификации, сыграла свою роль в становлении и развитии теплопередачи — науки о законах распространения тепла.

Трудно назвать другой технический объект, получивший столь коренные конструктивные изменения в первой половине XX в., как паровой котел. С другой стороны, трудно назвать другой технический объект, который подобно паровому котлу с момента своего возникновения и до наших дней, т. е. в течение двух с половиной столетий, развивался бы под действием только двух неизменных тенденций: повышение давления и повышение паропроизводительности. При этом, естественно, всегда было стремление повысить к. п. д. котла.

Под стимулирующим влиянием электрификации эти тенденции сильно обострились, направив внимание конструкторов и исследователей на всемерную интенсификацию физических факторов, определяющих напряженность работы котла в целом: температур, скоростей газов, воды и пароводяной смеси. Работа по достижению резкого повышения этих параметров и привела в первой половине

XX в. к коренному изменению конструктивных форм котлоагрегата. Рис. 11-1, где представлены схемы развития конструкций советских паровых котлов, дает, даже при неполноте охвата строившихся котлоагрегатов, общее представление в направлении развития конструктивных форм котлов, всецело отвечающем указанной выше основной тенденции.

Обзор схем показывает значительный относительный рост топочных объемов. В этом росте отражено стремление к интенсификации процесса горения, к повышению его температуры и полноты вне зависимости от качества топлива. С другой стороны, рост топочных объемов вызван переходом к камерному сжиганию вместо слоевого в связи с увеличением абсолютной величины котлов, при котором механизация слоевого сжигания становилась трудной, а ручное обслуживание уже не обеспечивало питания топок горючим. Повышение температуры горения потребовало защиты топочных стен и сводов. Для этой цели стали применять топочные экраны, предлагавшиеся в конце XIX в. В. Г. Шуховым, что явилось в то же время одним из факторов повышения удельного тепловосприятия котла вследствие крайне напряженного теплообмена экранных трубок.

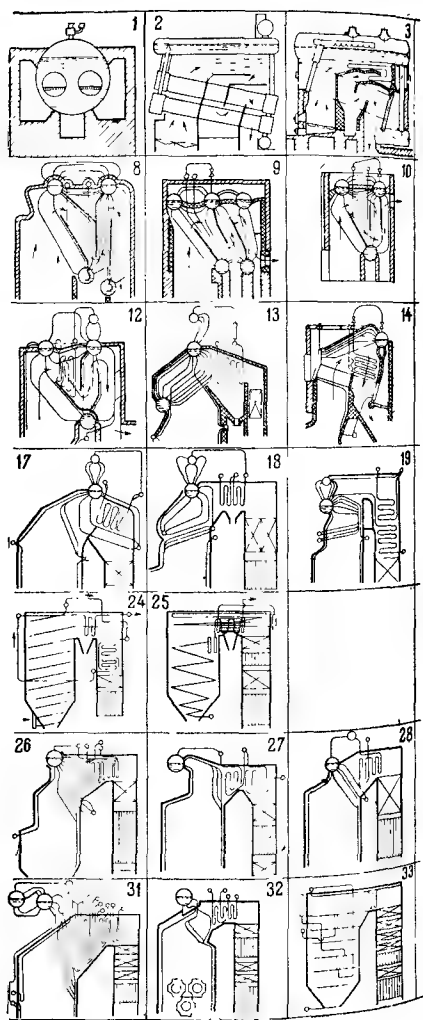
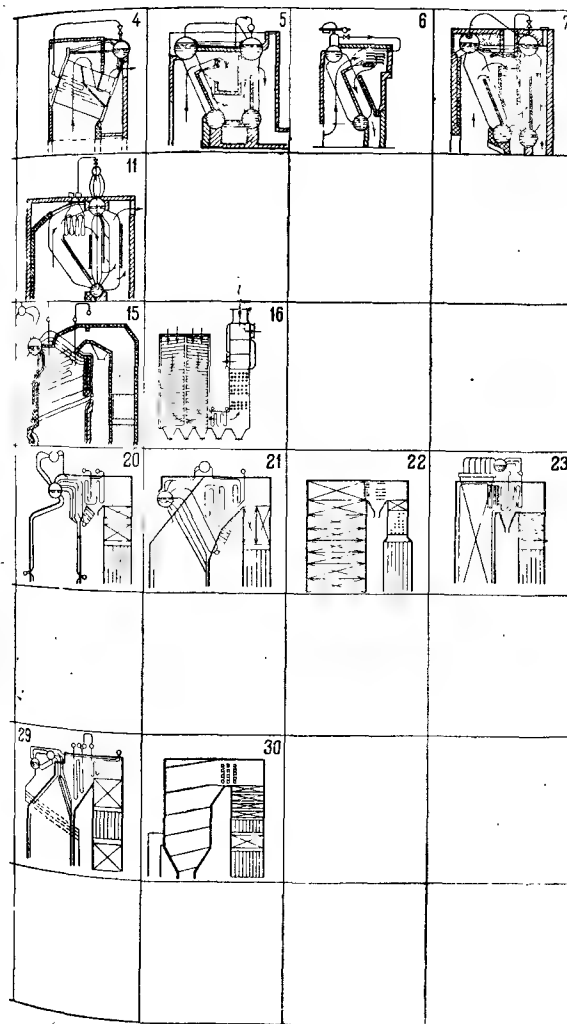


Рис. 11-1. Схемы развития

Все сильнее стало проявляться (заметное и на представленных схемах) перераспределение между величинами конвективных и радиационных поверхностей нагрева котлов. Это перераспределение вместе с рядом других факторов, среди которых большое значение имело повышение скорости газов и позволили увеличить удельный



1 — котел с двумя жаровыми трубами; 2—4 — „горизонтальные“ водотрубные котлы; 5—13 — „вертикальные“ водотрубные котлы; 14—15 — котлы „морского“ типа; 16, 22, 24, 25, 30, 33 — прямоточные котлы; 17—21; 26—28, 32 — однокотловые котлы; 23 — котел с принудительной циркуляцией; 29, 31 — двухкотловые котлы на высокие и сверхвысокие параметры пара.

конструкций советских паровых котлов,

паросъем с квадратного метра с десятков до сотен килограммов в час. Здесь снова проявилась интенсификация процессов, без которой задача высокой производительности котлоагрегатов не была бы решена.

Далее, на схемах видно значительное увеличение «хвостовых» поверхностей нагрева, существенно превысивших по своему метражу собственно котел как в радиационной, так и в конвективной его частях. Водяной подогреватель получил большое развитие и в последних ступенях регенеративного подогрева стал работать под котельным давлением, восприняв на себя функцию подогрева воды почти до парообразования. Развитие конструкций экономайзеров представляло собой важный шаг на пути повышения к. п. д. парового котла. В области повышения к. п. д. были достигнуты в первой половине XX в. большие успехи: в отдельных котельных установках к. п. д. возрос с 50—60% до значений, превышающих 90%.

На этих же схемах видны возникновение и развитие воздухоподогревателей, интенсифицирующих процесс сгорания путем подачи в топку воздуха, нагретого до высокой температуры. Распределение водяных и воздухоподогревателей в газоходах котла производится с точным учетом теплообмена и баланса регенерации тепла, осуществляемой соответствующим нагревом воды в разных ступенях водоподогревателя.

На представленных схемах развития котлоагрегатов отчетливо заметно изменение, относящееся к барабанам котлов. Если первый тип котлов являлся котлом-барабаном, а ряд последующих типов имел 1, 2, 3, 4 и 5 барабанов, то в 30-х годах преобладающими становятся конструкции с одним барабаном или же совсем не имеющие барабана. Уменьшение числа барабанов вызывалось тем, что с ростом котельного давления барабан становится самой дорогой частью котла. Кроме того, изменяется роль барабана как водяного аккумулятора, т. е. емкости, служащей как для выравнивания колебаний потребления пара, так и для работы при многократной циркуляции пароводяной смеси по трубкам котельных поверхностей нагрева. Поперечное сечение котельных трубок уменьшаются (наружный диаметр со 100 до 40 мм, а внутренний с 90 до 32 мм), а это при одновременном увеличении их суммарной длины и длины контура усложнило задачу обеспечения циркуляции за счет разности плотностей воды и пароводяной смеси в нисходящих и восходящих циркуляционных

потоках. Со всей остротой встала задача применения принудительной циркуляции, осуществляемой специальными циркуляционными насосами. Были разработаны конструкции с принудительной многократной циркуляцией и одним барабаном в качестве выравнивающей емкости, предложенные Ла-Монтом; стали конструироваться безбарабанные котлы с принудительной однократной циркуляцией, давно предлагавшиеся многими изобретателями, но требовавшие перехода от принципиальных схем к рационально разработанной и надежной конструкции (так называемые *прямоточные котлы*). Такие конструкции сначала возникли в Германии в 20—30-х годах XX в. В СССР пионером в конструировании прямоточных котлов явился проф. Л. К. Рамзин. Первый крупный котел его конструкции производительностью 160 т пара в час при давлении 140 атa был установлен в 1934 г. на ТЭЦ № 9 Мосэнерго.

Таким образом, рассмотрение схем развития котлоагрегатов позволяет выделить видимые тенденции развития котлов в рассматриваемый период:

- а) увеличение топочных объемов, переход от слоевого сжигания к факельному в топках-камерах;
- б) введение широко развитых радиационных поверхностей — экранов;
- в) увеличение «хвостовых» поверхностей нагрева: водяных и воздушных подогревателей;
- г) сокращение числа барабанов;
- д) введение принудительной циркуляции;
- е) освоение конструкций прямоточных безбарабанных котлов с однократной принудительной циркуляцией.

Для того чтобы обеспечить действие перечисленных конструкций, нужно было расширить номенклатуру вспомогательного оборудования котельных и создать вентиляторы для нагнетания воздуха в воздухоподогреватели и дымососы для удаления дымовых газов (вследствие увеличившихся сопротивлений при скоростях газов, выросших с 2—4 до 10—16 м/сек и снижения их температуры до 180—160°С естественную тягу нельзя обеспечить дымовой трубой даже километровой высоты).

Наконец с переходом к прямоточным котлам, не обладающим аккумулярующей способностью, потребовалось осуществить автоматизацию управления котельными установками, точный и оперативный тепловой контроль за их работой, большую надежность их работы.

Особое и ответственное место приобретала сложная работа по топливоприготовлению и водоподготовке. Размол и подсушка топлива для сжигания его в факелах в виде аэропыли потребовали разработки и освоения ряда дополнительных технических устройств: угольных мельниц, циклонов, труб-сушилок, дозаторов, транспортеров, горелок и приборов для контроля за их действием.

Подготовка питательной воды, к чистоте которой предъявляются исключительно высокие требования, привела к необходимости строительства водоподготовительных цехов со сложным фильтрационным и химическим оборудованием, с лабораториями химического контроля за качеством питательной воды.

Так, в рассматриваемый период котельная из загрязненного и пыльного помещения, обслуживаемого кочегарами с низкой квалификацией и механиками с начальной технической подготовкой, превратилась в просторный и светлый зал со сложным оборудованием, работающим под автоматическим и лабораторным контролем, под наблюдением технических работников высокой квалификации.

Возникает вопрос: насколько рассмотренное усложнение котлоагрегатов и котельных установок позволило повысить паропроизводительность и параметры пара? На это четкий ответ дают кривые, приведенные на рис. 11-2—11-4.

На рис. 11-2 видно, что паропроизводительность котлов в течение 200 лет от первых котлов Севери, дававших 100—200 кг/ч, выросла до 15 т/ч, т. е. в среднем в 75—150 раз. За последующие полвека она возросла с 15 до 660 т/ч и, следовательно, увеличилась в 44 раза.

На рис. 11-3 отчетливо виден рост котельного давления: со времени изобретения машины Ньюкомена до 1913 г., т. е. более чем за 200 лет, давление выросло

в среднем в 16 раз — с 1 до 16 *ата*; с 1913 г. по 1957 г. — более чем в 13 раз, достигнув почти 200 *ата*.

Рост перегрева пара, в значительной степени зависящий от успехов металлургии, показан на рис. 11-4.

Температура пара, увеличившаяся в течение 200 лет (XVIII и XIX вв.) в 3 раза (рис. 11-4) (со 100 до 300°С), за последние 45 лет выросла почти в 2 раза (с 300 до 570°С); таким образом, за первые 200 лет среднее годовое увеличение составляло 1°С, а за последние 45—6°С в год, несмотря на то, что теперь применяется давление не 1, а 170 *ата*. Высокое качество металла, который светится от высокой температуры и одновременно выдерживает такое давление, хорошо иллюстрирует историческую тенденцию роста одного из качественных показателей техники — интенсивности ее использования.

Значительно изменился еще один серьезный фактор интенсификации, а именно использование металла, выражающееся в удельной металлоемкости котельных конструкций (без «хвостовых» поверхностей) на 1 кг вырабатываемого в час пара. Эта характеристика такова для различных типов котлов:

Жаротрубные котлы	10 кг/кг
Вертикальные В. Г. Шухова . . .	6 "
Вертикально-водотрубные	5 "
Камерные горизонтально-водотрубные	4 "
Секционные В. Г. Шухова	2,6 "

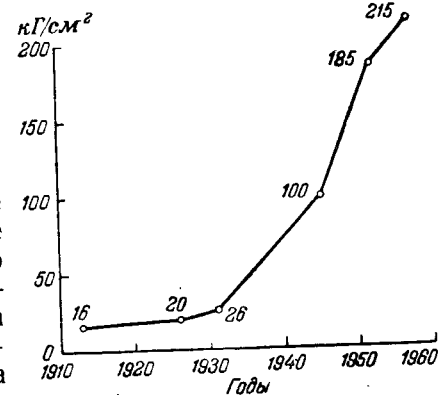


Рис. 11-3: Пызышение котельного давления.

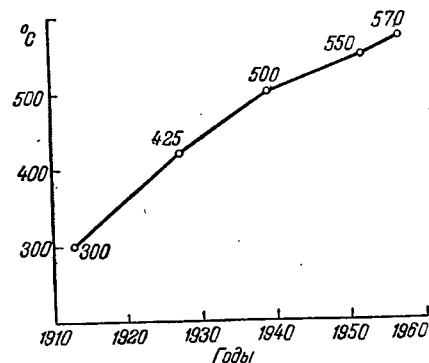


Рис. 11-4: Пызышение температуры перегрева пара.

Однобарабанные До 1,5%
Прямоточные „ 1 „

В развитии котельной техники, неизмеримо усложнявшейся в наше время, в СССР принимают участие коллективы заводов и научно-исследовательских институтов. В нашей стране еще в 1921 г. был организован Теплотехнический институт (ныне Всесоюзный теплотехнический институт имени Ф. Э. Дзержинского), в 1928 г. — Ленинградский областной теплотехнический институт (ЛОТИ) в 1934 г. — Бюро прямоточного котлостроения (БПК), в 1935 г. — Центральный котлотурбинный институт (ЦКТИ). В этих институтах, а также в Энергетическом институте Академии наук СССР имени акад. Г. М. Кржижановского (ЭНИН), в Московском энергетическом институте (МЭИ) проводились систематически научные исследования, обеспечивавшие прочную научную базу отечественного котлостроения.

Что касается зарубежного котлостроения, то поскольку в передовых в техническом отношении капиталистических странах электрификация началась раньше, там раньше пришлось решать те же задачи всесторонней интенсификации работы котлоагрегатов. Котельная техника капиталистических стран прошла в основном те же технические ступени развития. Основная разница заключалась в темпах развития. Начав гораздо позднее и сильно отставая от зарубежных стран, наша страна в настоящее время находится на одном техническом уровне по котлостроению с наиболее развитыми капиталистическими странами, включая США.

Другое различие состояло в необходимости освоения широкой номенклатуры разнообразных топлив. В начальный период котлостроения в СССР было сделано все возможное для эффективного использования местных низкокалорийных, влажных и зольных топлив, в чем мы значительно превзошли зарубежное котлостроение.

В капиталистических странах фирма покупает изобретения вместе с именем их изобретателей; новые конструкции получают имя фирмы, купившей патент. Поэтому не представляется возможным указать на авторов отдельных изобретений и нововведений в области развития котельной техники за границей. Что касается советского котлостроения, мы можем дополнить перечень творцов новой котельной техники именами советских конструкторов и изобретателей.

В 30-х годах Советский Союз вышел на первое место в мире по методам промышленного сжигания торфа в топках крупных паровых котлов. Котлостроительная практика не знала таких методов, и их освоение легло на плечи советских конструкторов и изобретателей. Уже в 1921 г. на Шатурской электростанции были впервые опробованы шахтно-цепные топки для сжигания кускового торфа, раз-

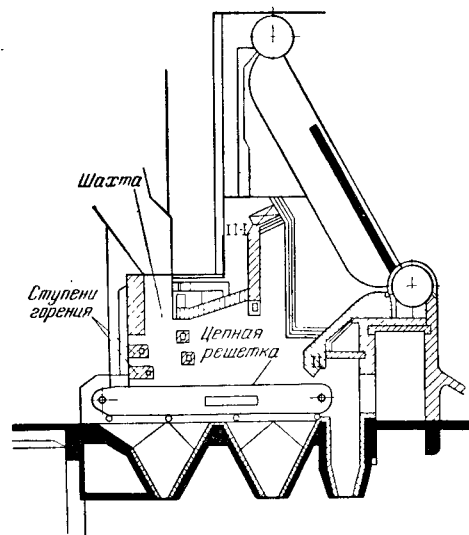


Рис. 11-5. Схематический разрез через торфяную топку Т. Ф. Макарьева.

работанные проф. Т. Ф. Макарьевым (рис. 11-5). В шахте этой топки производится подсушка торфа, сжигаемого на цепной решетке, чем сразу же достигается полная механизация обслуживания торфяных топок с высоким к. п. д. котла, достигающим 87%.

В 1929—1930 гг. в СССР сложилась научная школа теплового моделирования, возглавлявшаяся М. В. Кирпичевым. Теория теплового моделирования имеет громадное значение в изучении тепловых процессов, в первую очередь таких сложных, какие протекают в паровых котлах. Котлы явились одними из первых технических объектов, для которых были разработаны научные основы теплового расчета, базирующиеся на результатах теплового моделирования, позволившего с исключительной точностью воспроиз-

водить на моделях натурные внутрикотловые процессы еще в ходе проектирования котлов (рис. 11-6).

В 1931 г. Л. К. Рамзин предложил разработанную им конструкцию прямоточного безбарабанного парового котла. Успешные испытания небольшого опытного котла дали возможность спроектировать и построить крупнейший в мире по паропроизводительности прямоточный

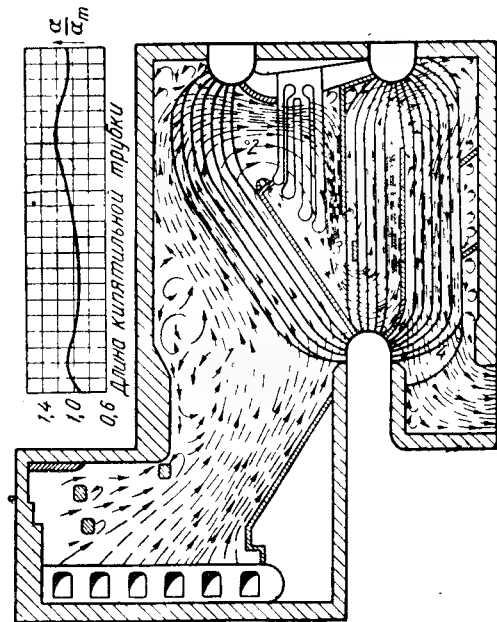


Рис. 11-6. Схема теплового моделирования движения газов по газоходам парового котла по методу акад. М. В. Кирпичева.

котлоагрегат на 160—200 т/ч пара при давлении 140 ата. За рубежом в это же время прямоточное котлостроение характеризовалось следующими данными: в 1932 г. в Германии фирмой Сименс-Шуккерт был построен котел на 100—135 т/ч для судна и электростанции; тогда же швейцарский завод Зульцер построил котлы на 8 и 18 т/ч; в 1934 г. в США заводом фирмы «Дженерал Электрик» был сконструирован прямоточный котел производительностью 9,6 т/ч.

Значительный вклад в развитие советского котлостроения сделал проф. В. Н. Шретер своими трудами по расче-

ту и эксплуатации паровых котлов, а также организацией в Ленинграде Бюро теплотехнических испытаний, явившегося позднее одной из групп, организовавшихся в ЦКТИ.

В июне 1954 г. в СССР вступила в строй первая в мире атомная электростанция. Для этой станции были спроектированы и построены котел-теплообменник и элементы атомного реактора, отводящие от него тепло, выделяемое в процессе ядерного распада. Атомная станция работает бесперебойно и позволила накопить ценный опыт, учитываемый при постройке новых мощных атомных станций.

Развитие турбостроения

За шесть-семь десятков лет своего развития в качестве двигателя электрических генераторов для электростанций паровая турбина не получила столь радикальных конструктивных изменений, как паровой котел. Однако путь от паровой турбины 1 000 кВт к турбине 300 000 кВт не является результатом простых количественных накоплений. Переход от использования пара 12 ата и 300°С к использованию пара 200 ата и 600°С, от пропуска через турбину 15 т/ч пара к пропуску 660 т/ч требовал решения сложнейших научно-технических проблем.

В области турбостроения, как и в области котлостроения, наша страна в 20-х годах XX в. сильно отставала от ведущих зарубежных стран. К середине 20-х годов заводы Парсонса (Англия) выпускали турбины мощностью 25 000 и даже 50 000 кВт, фирма «Вестингауз электрик» (США) — до 30 000 кВт, фирма «Дженерал Электрик» (США) — 35 000—45 000 кВт.

В СССР первая турбина, построенная в 1924 г. на Ленинградском металлическом заводе (рис. 11-7), имела мощность только 3 000 кВт и была рассчитана на работу с паром 12 ата и 300°С. В это время фирма «Броун-Бовери» уже построила турбинную установку на давление пара 50 ата и перегрев до 450°С.

Главное отличие развития и в данном случае состояло в темпах. Отечественное турбостроение за 30 лет прошло путь, на который капиталистическим странам понадобилось 60 лет.

Основные тенденции мирового турбостроения заключаются в концентрации в одном агрегате все больших мощностей и снижении эксплуатационных расходов путем повышения к. п. д. как за счет совершенствования термодинамических циклов, так и за счет использования пара высоких давления и температуры.

Рост параметров пара, его давления и температуры отражен выше на рис. 11-3 и 11-4, характеризовавших развитие котлостроения. Рост единичной мощности паровых турбин, выпускавшихся в СССР, показан на рис. 11-8. Простое сопоставление мощностей советских турбин и турбин лучших зарубежных заводов подтверждает тот факт, что советское турбостроение находится на уровне мировой техники турбостроения. Надо заметить, что еще в 30-х годах

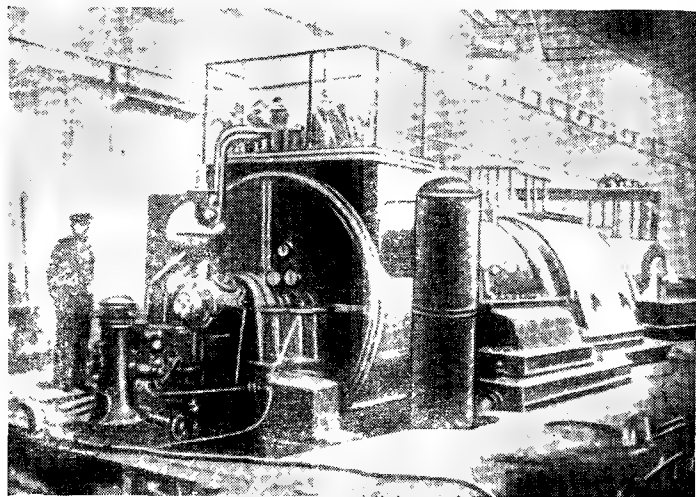


Рис. 11-7. Первая советская паровая турбина ЛМЗ (1924 г.).

в США работали более мощные турбинные установки. Одна из них, в частности, имела мощность 209 000 кВт. Но все эти установки были двухвальными или даже трехвальными и представляли, таким образом, две или три отдельные турбины с последовательным прохождением через них пара. Первая советская турбина 100 000 кВт была построена одновальной, и это прогрессивное техническое решение было сохранено и в турбинах более высокой мощности: 150 000, 200 000 и 300 000 кВт.

Следует отметить также, что быстро развивавшаяся в нашей стране теплофикация, поставила свои требования турбостроителям, ответившим на них выпуском в 1933 г. первых мощных теплофикационных паровых турбин с регулируемым отбором пара (рис. 11-11).

Быстрый рост единичной мощности турбин позволил уверенно наращивать установленную мощность электростанций без увеличения или даже со значительным уменьшением числа устанавливаемых турбин (см. рис. 1-1). Так, в 1930—1931 гг. трехкратное увеличение установленной мощности было достигнуто при числе турбин, уменьшившемся более чем вдвое. При этом повышался к. п. д. установок и резко снижался расход металла (нужно отметить, что турбина 100 000 кВт, 3 000 об/мин не отличается по габаритам и весу от турбины 50 000 кВт при 1 500 об/мин).

Уменьшение расхода металла на единицу установленной мощности (металлоемкость), достигнутое путем применения повышенных чисел оборотов вала и крупных установок, показано на рис. 1-22, где видно, что переход от турбины 3 000 кВт к турбинам 100 000 кВт в 8 раз снижает удельную металлоемкость.

В 1937 г. Ленинградский металлический завод освоил производство быстроходных паровых турбин на 3 000 об/мин. Это были конденсационные турбины: одна — однокорпусная мощностью 50 000 кВт (рис. 11-9), вторая — двухкорпусная одновальная мощностью 100 000 кВт. Третья турбина была осуществлена с промышленным отбором пара: ее мощность 50 000 кВт с отбором 200 т/ч пара при давлении 7 атм. Все три турбины были спроектированы на стандартное в те годы давление пара 29 атм с перегревом до 400°С.

В 1938 г. единичная мощность в одновальной турбине 100 000 кВт была достигнута и молодым Харьковским турбогенераторным заводом. Турбина предназначалась для работы паром тех же стандартных параметров (29 атм, 400°С), но при 1 500 об/мин.

Период войны 1941—1945 гг. явился для советского турбостроения, как и для котлостроения, периодом углубленной научной и технической подготовки к новым техни-

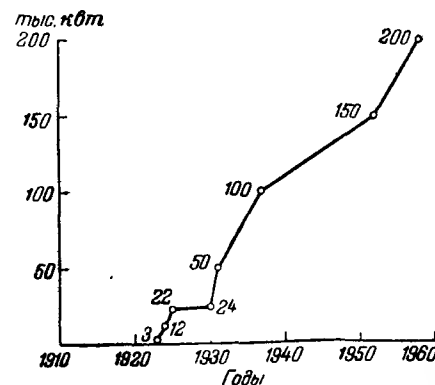


Рис. 11-8. Рост единичной мощности советских паровых турбин.

ческим достижениям, к освоению пара высокого давления. Установленный до войны (1934 г.) уникальный прямоточный котел Л. К. Рамзина с давлением пара 140 *ата* был единственным высокопроизводительным котлом высокого давления, которое срабатывалось импортной турбиной высокого (120 *ата*) давления. Нужен был решительный переход к высоким параметрам пара, стимулировавшийся

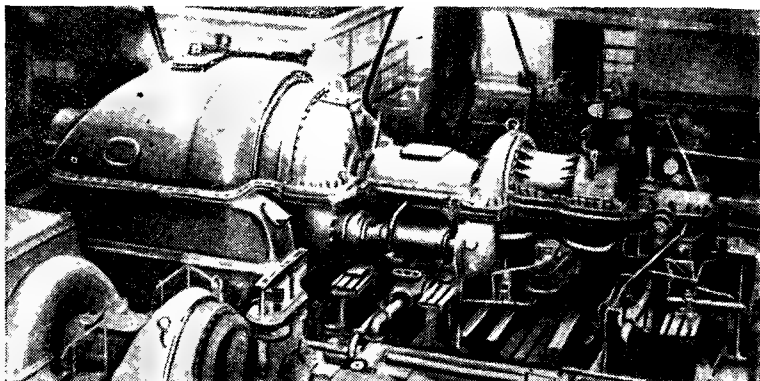


Рис. 11-9. Турбина ЛМЗ мощностью 50 000 *квт* во время сборки.

планами развития энергетики, планами дальнейшей электрификации. Рост количества выработанной электроэнергии сильно увеличивал абсолютную цену каждого процента экономии топлива, каждого процента повышения к. п. д. Улучшение внутреннего относительного к. п. д. паровых турбин уже не могло давать заметного роста. Но в области интенсификации тепловых процессов, заключавшейся в данном случае в повышении параметров пара, еще имелись большие резервы для повышения экономичности работы паровых силовых установок.

Используя эти резервы, работники ЛМЗ в 1946 г. спроектировали новую одновальную паровую турбину 100 000 *квт*, но на высокие параметры (90 *ата*, 500° С), позволившие повысить экономический к. п. д. на 15 %.

После восстановления Харьковского завода на нем стали строиться турбины специального назначения, сыгравшие большое значение в реконструкции и модернизации

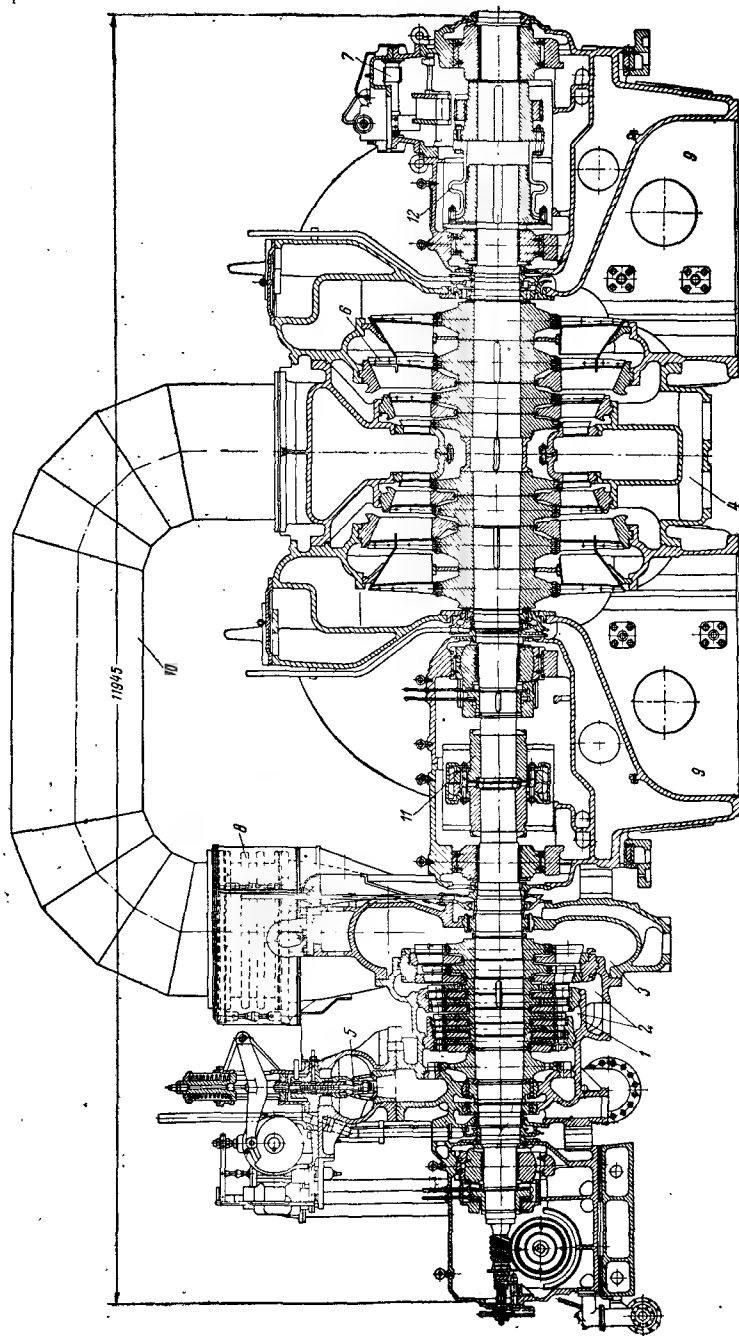


Рис. 11-10. Турбина ЛМЗ 100 000 *квт* при 3000 об/мин.

ранее построенных электростанций. Эти противодавленные турбины мощностью 25 000 кВт устанавливались на старых станциях вместе с новыми котлами высокого давления (90 ати, 500°С). Отработавший пар при 29 ати поступал в старые турбины. Введение предвключенных турбин высокого давления на старых станциях принесло громадный экономический эффект.

В 1952 г. ЛМЗ выпустил уникальную паровую турбину высокого давления (170 ати, 550°С) мощностью 150 000 кВт. После первых ступеней турбины с целью избежать влажности пара в последних ступенях пар получал вторичный перегрев до 520°С. Эта турбина, получившая название «турбины мира», позволила снизить удельный расход топлива по сравнению с турбинами довоенных параметров пара на 27%.

Одним из методов повышения производительности турбостроительных заводов явилась унификация значительно числа элементов и узлов паровых турбин. Так, выпускаемые ЛМЗ турбины 25, 50 и 100 тыс. кВт имеют ряд одинаковых деталей и узлов. Применение унифицированных узлов и деталей дает возможность легко осуществлять серийный выпуск машин, повысить производительность и организовать контроль качества, а в эксплуатации турбин облегчает использование запасных частей.

Освоение быстроходных турбин большой мощности требовало преодоления ряда технических трудностей. Одна из таких трудностей состоит в обеспечении пропуска громадных объемов пара через последние венцы конденсационной турбины. Для турбин 50 000 и 100 000 кВт при среднем диаметре 2 м длина лопатки последней ступени достигает 665 мм и центробежное усилие, стремящееся оторвать лопатку от диска, составляет при 3 000 об/мин величину 421 000 кг. Еще большие усилия действуют на последние лопатки турбин 150 000 и 200 000 кВт. Если учитывать возможность вибрационной нагрузки лопатки и сильную эрозию под действием влажного пара, несущего в себе с громадной скоростью до 14% мелко распыленных капелек конденсата, бомбардирующих лопатки, то можно представить, насколько сложна работа по обеспечению надежности последних ступеней мощных быстроходных турбин и как интенсивно напряжен их материал.

Высокое напряжение материала турбин приводит к тому, что достаточно на несколько процентов превысить допускаемую скорость вращения, как может произойти круп-

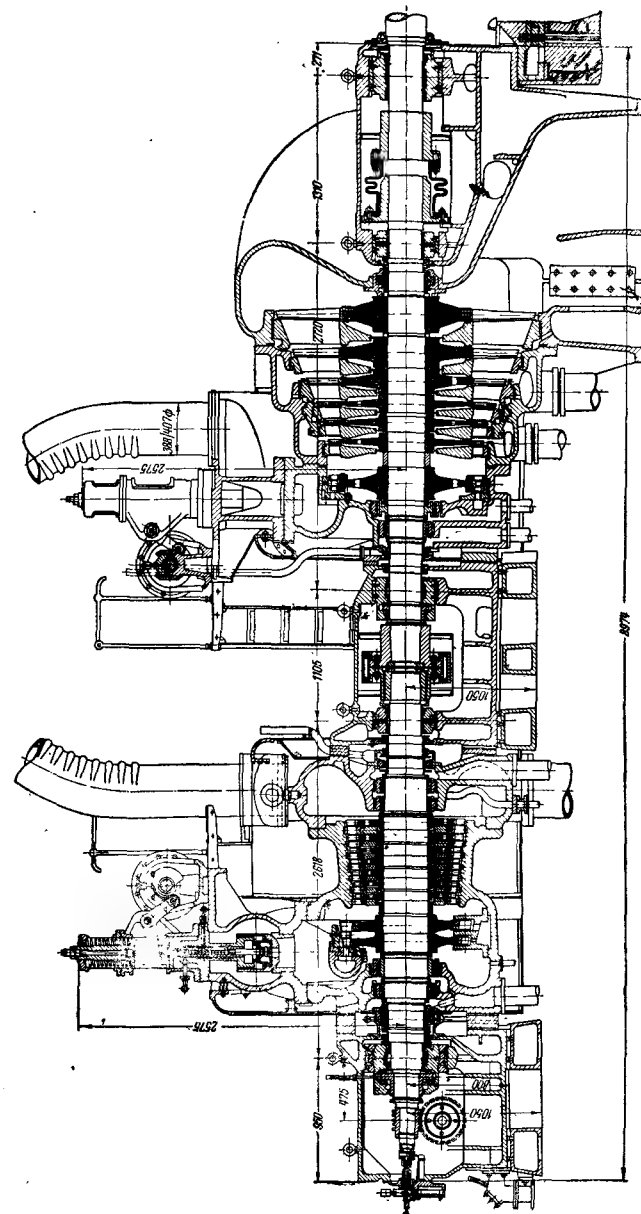


Рис. 11-11. Теплофикационная турбина 25 000 кВт с отбором пара.

ная авария. Отсюда возникает необходимость точного регулирования числа оборотов турбины, осложняемого потребностью поддерживать постоянное число оборотов в пределах не более 5%, несмотря на изменения силовой и тепловой нагрузок, колеблющихся в самых широких пределах в зависимости от нужд потребителей тепла и электроэнергии.

Развитие газовых турбин

Работы первых строителей газовых турбин (см. гл. 7) в 20-х годах продолжил в нашей стране проф. В. М. Маковский. В результате длительных и упорных исследований он осуществил в Донбассе первую опытную установку для работы на газе, получающемся путем подземной газификации угля. Вероломное нападение немецких фашистов на СССР прервало многообещающие работы проф. Маковского и его учеников. Турбина и все сооружения по ее испытанию были разрушены.

С 50-х годов XX в. газотурбинные установки стационарного назначения начали строиться в ряде стран в широком диапазоне мощностей: 50—30 000 кВт. Был достигнут экономический к. п. д. (в зависимости от мощности) 15—34%. Температура газа в начале расширения у большинства газовых турбин имеет величину порядка 650—750°С, что определяется длительностью эксплуатации и возможностями металлургии жароупорных сталей. Проектируются газотурбинные установки на 40 000 и 50 000 кВт. В газовых турбинах замкнутого цикла (см. стр. 192) может быть достигнуто значение экономического к. п. д. 50% и выше, хотя их сооружение усложняется необходимостью создавать в теплообменниках громадные теплообменные поверхности. Весьма перспективным является использование в газотурбинных установках в качестве рабочего тела гелия или углекислоты, нагреваемых в атомных реакторах на атомных электростанциях. В этом случае возможно достижение высоких мощностей порядка 200 000—300 000 кВт в одном агрегате.

Идея Маковского об использовании в газовой турбине газа, получаемого при подземной газификации углей, была реализована на первой в мире газотурбинной угольной электростанции (Шатская электростанция, Тульская обл.), пущенной в 1957 г. Эта станция оборудована двухступенчатыми газовыми турбинами мощностью по 12 000 кВт (рис. 11-12), работающими на газе из высокозольного (до 45%) и влажного (до 30%) бурого угля; при подземной

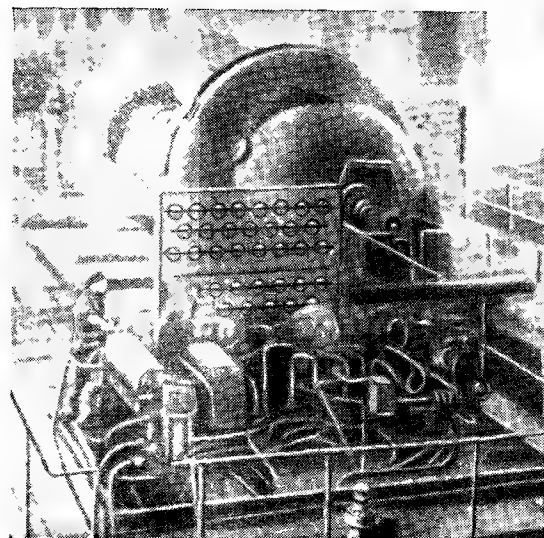


Рис. 11-12. Газовые турбины Шатской электростанции.

газификации этого топлива образуются горючие газы с теплотворной способностью 700—900 ккал/м³.

Директивы по семилетнему плану предусматривают большое развитие как стационарных, так и транспортных (газотурбовоз) газовых турбин.

Развитие тепловой части тепловых электростанций	Развитие тепловой части тепловых электрических станций определялось прежде всего техническим уровнем основных агрегатов теплоэнергетического оборудования: паровых котлов и паровых двигателей. В зависимости от мощности, параметров и габаритов этого оборудования решались вопросы компоновки электрических станций, в развитии которых можно достаточно отчетливо выделить четыре последовательно сменявшие друг друга этапа, схематически представленных на рис. 11-13.
---	---

Первый этап характеризуется применением ручных топок со слоевым сжиганием на плоских колосниковых решетках, расположенных под котлами различных старых типов от жаротрубных до горизонтальных водотрубных. С количественной стороны этот этап характеризуется паропроизводительностью котлов порядка 3 т/ч и мощностью

паровых двигателей порядка 5 000 квт. С качественной стороны этот период характеризуется применением пара давлением до 15 атм с перегревом до 300° С. Этот первый этап по времени для наиболее развитых в экономическом отношении стран относится в основном к концу XIX в.

Первая четверть XX в. характеризуется качественными изменениями в трех основных направлениях. Первое направление заключается в механизации топок, ручная за-

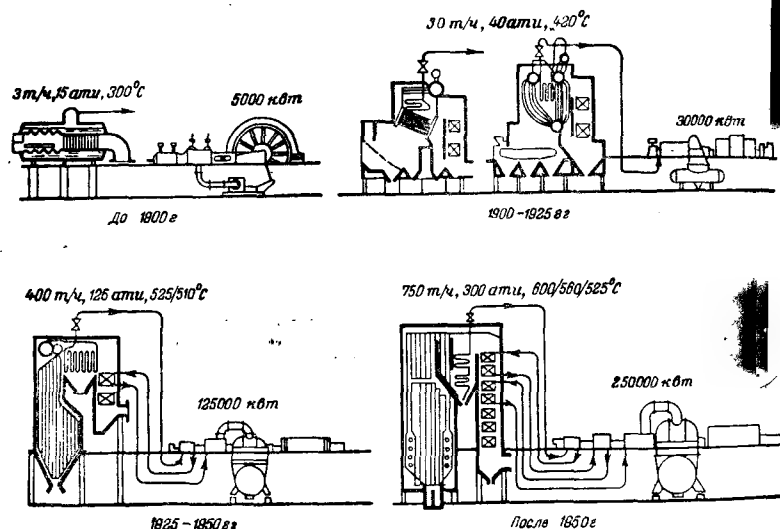


Рис. 11-13. Схема четырех периодов развития тепловой части электрических станций.

грузка которых становится непосильной при возросшей паропроизводительности котлов. Для бурых углей разработаны конструкции ступенчатых топок, для каменных углей — топок с цепными решетками. Второе направление состоит в переходе к водотрубным котлам с меньшим диаметром барабанов и большим количеством труб в связи с ростом давления пара и производительности котла. Основными типами котлоагрегатов в этот период являлись горизонтально или вертикально-водотрубные котлы. Третье направление состоит в замене паровой машины паровой турбиной. Качественные характеристики этого периода значительно возрастают: паропроизводительность котлоагрегатов достигает значения 30 т/ч, мощность турбогенерато-

ров—30 000 квт. Качественные характеристики: пар давлением до 40 атм, перегретый до 420° С. Развитие тепловой части станций в этот период значительно тормозилось топками слоевого сжигания, лимитировавшими возможность повышения паропроизводительности паровых котлов.

Отсюда для второго этапа, относящегося к первой четверти XX в., характерно соотношение между числом турбин и котлов порядка 1 : 5 — 1 : 8. Необходимость установки по 5—8 котлов на одну турбину отражалась прежде всего на компоновке тепловой части электростанций с двухрядным размещением котлов. Здесь следует вспомнить, что, например, на Нью-Йоркской электростанции 1898 г. двухрядное размещение распространялось на три этажа и было в известной степени шестирядным. Примером характерной электростанции этого периода может служить станция «Электропередача», сооруженная Р. Э. Класоном на Богородских торфяных болотах в Московской обл. (рис. 11-14). Котельная этой станции — двухрядная с котлами 3, обращенными своими фронтами к центральному коридору котельной. Торф с лент 1 загружался в бункера 2, из которых он поступал в топки 4. За котлами располагались экономайзеры 5 и дымососы 6, отсасывающие топочные газы в два ряда дымовых труб 7. Турбогенераторы 8 располагались поперек машинного зала. Первые советские тепловые электростанции, строившиеся по плану ГОЭЛРО (Шатурская, Штеровская и др.), осуществлялись с двухрядными котельными.

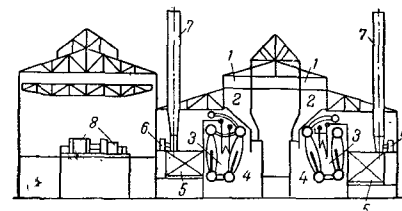


Рис. 11-14. Схема компоновки электростанции «Электропередача».

1 — галереи для транспортеров, подающих топливо; 2 — бункера для торфа; 3 — котельные агрегаты; 4 — шахтные топки; 5 — экономайзеры; 6 — дымососы; 7 — дымовые трубы; 8 — турбогенератор.

Третий этап развития (рис. 11-13) характеризуется переходом к факельному сжиганию угля в виде пыли в громадных камерных топках, экранированных для защиты обмуровки радиационными поверхностями нагрева, увеличившими удельную паропроизводительность. Стремление интенсифицировать процесс горения вызывает введение воздухоподогревателей. Сильно изменяются количественные и качественные показатели теплосиловых установок этого этапа. Паропроизводительность котлов достигает

35 История энергетической техники.

400 т/ч, мощность турбогенераторов — 150 000 квт. Давление пара возрастает до 125 атм, что вынуждает применять промежуточный перегрев пара во избежание слишком большого его увлажнения на последних дисках конденсационных турбин. Температура пара перед турбиной имеет уже порядок 525° С. После работы в части высокого давления турбины пар поступает во вторичный перегреватель, где он перегревается до температуры порядка 510° С.

Этот период характерен применением однобарабанных и безбарабанных котлов. В связи с этим количество

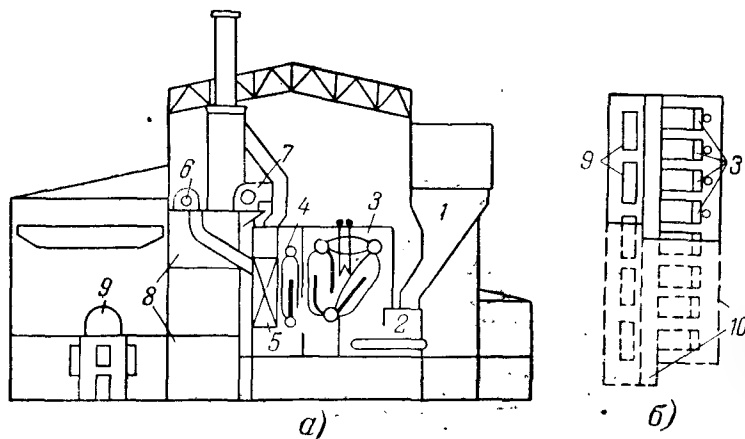


Рис. 11-15. Схема Ивано-Вознесенской ГРЭС.

а — разрез станции; б — план;
1 — бункеры котельной; 2 — шахтно-цеппная топка; 3 — котельные агрегаты; 4 — экономайзер; 5 — воздухоподогреватель; 6 — дутьевой вентилятор; 7 — дымосос; 8 — помещение (этажерка) для распределительного устройства собственных нужд и вспомогательного оборудования тепловой части электростанции; 9 — турбогенераторы; 10 — расширение электростанции.

котлов на турбину снижается и доходит до одного, а котельные становятся однорядными, расположенными параллельно машинному залу; число котлов сначала превышает число турбогенераторов (рис. 11-15), а потом становится равным ему (рис. 11-16). Таким образом, происходит возникновение «блочных» станций, являющееся повторением на новом, неизмеримо возросшем уровне самого раннего этапа развития паросиловых установок, когда Т. Ньюкомен, И. И. Ползунов и Дж. Уатт строили «блоки», состоявшие из одного котла и одной машины.

Развитие блочных установок характеризует четвертый, современный этап (см. рис. 11-13), отличающийся высо-

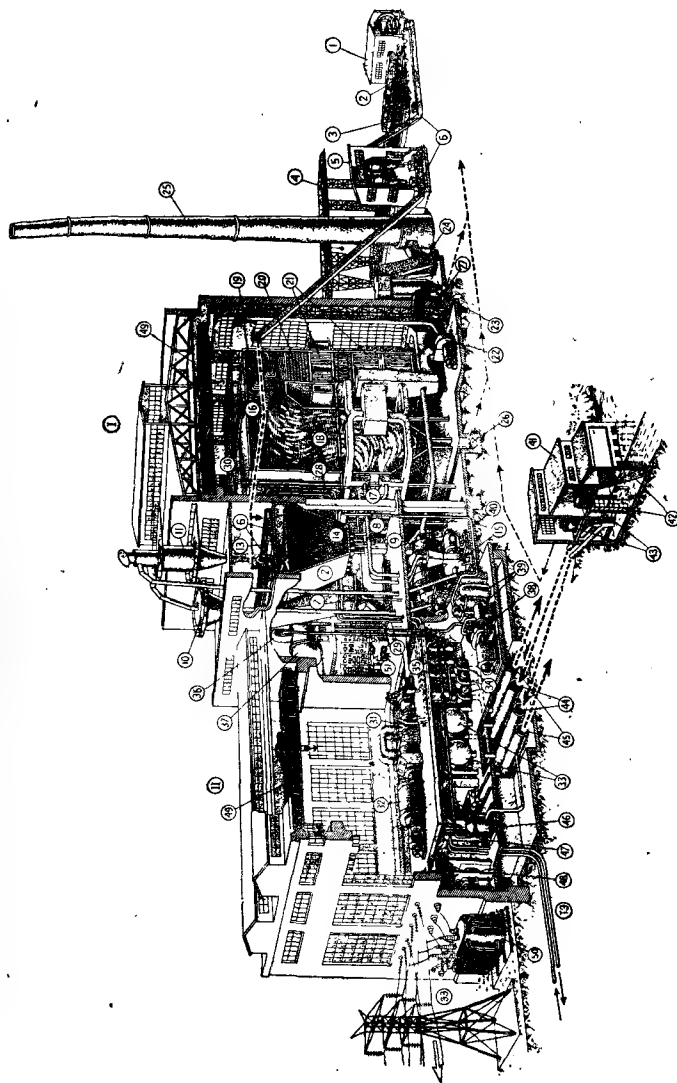


Рис. 11-16. Схема блочной станции.

1 — котельное помещение; 11 — машинный зал;
12 — устройство с вагонопроводом; 13 — угольный склад; 14 — дробильная установка; 15 — бункер угольной пыли; 16 — котельный агрегат; 17 — золоуловитель; 18 — дымососы; 19 — паровая турбина типа ПК-200; 20 — электрический генератор; 21 — паровые конденсаторы; 22 — деаэрагор; 23 — распределительное устройство собственных нужд; 24 — электрический повышающий трансформатор; 25 — щит управления блоком электростанции; 26 — вывод электроэнергии высокого напряжения; 27 — вывод тепловой энергии с горячей водой.

кой паропроизводительностью котлоагрегатов (750 т/ч), способных снабжать паром находящуюся в блоке турбину мощностью порядка 250 000 кВт. Сверхкритические параметры пара, имеющего давление 300 атм, требуют осуществления двойного промежуточного перегрева пара, имеющего температурные ступени: 600°С — перед турбиной, 560°С — перед частью среднего давления и 525°С — перед частью низкого давления турбины.

За последние 10—15 лет отчетливо выявились громадные преимущества блочных систем, что видно из приводимой таблицы. С укрупнением мощности блоков и повышением параметров пара значительно снижаются расход тепла, металла, объем здания и количество обслуживающего персонала. Так, станция одной и той же мощности 300 000 кВт из трех блоков по 100 000 кВт (см. таблицу колонка Б) требует значительно меньшей кубатуры здания, количества металла и персонала, чем станция из четырех блоков по 75 000 кВт (колонка А); экономический эффект значительно возрастает при переходе к станции из одного мощного блока 300 000 кВт (колонка В).

Установленная мощность, кВт	А	Б	В
	300 000	300 000	300 000
Число и мощность турбогенераторов, кВт	4×75 000	3×100 000	1×300 000
Число и паропроизводительность котлов, т/ч	4×250	3×300	1×800
Параметры острого пара	150 ат 550°С, 510	200 ат, 560°С 560	300 ат, 650°С 600 и 560
Промежуточный перегрев, °С	510	560	600 и 560
Удельный расход тепла, ккал/кВт·ч	2 500	2 300	2 000
Удельный расход металла, кг/кВт	90	75	50
Необходимый объем здания, м³/кВт	1	0,7	0,5
Обслуживающий персонал, чел. на 1 000 кВт	1	0,5	0,3

Помимо очевидных из таблицы преимуществ, блочная система дает новые возможности в области автоматизации обслуживания. Блок позволяет обслужить котлоагрегат и турбогенератор, объединенные работой на одну общую нагрузку, единой общей для блока системой контроля и авто-

матики. Любое изменение нагрузки на выходе как электрической, так и тепловой будет немедленно влиять на все регулируемые параметры блока: тепловыделение в топочном объеме, температуру перегрева пара, питание котла водой, поступление пара в турбину и его распределение между тепловым и энергетическим потреблением.

Преимущество блочной системы в отношении экономии топлива, металла, капиталовложений, объема станционных зданий, живого труда, сокращения срока строительства делают эту систему очень перспективной, и она находит все более широкое распространение во всех индустриальных странах мира.

11-2. РАЗВИТИЕ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ

Электрификация
как фактор
прогресса
гидроэнергетики

Лауфен-франкфуртская электропередача, успех которой явился триумфом техники трехфазного тока, оказалась важным этапом в области гидроэнергетики. Использование водной энергии в этой установке имело большое значение, так как оно показало возможность использования гидроресурсов, отдаленных от промышленных центров. С этого времени возрастает число гидроэлектрических установок. Проекты крупных гидроэлектростанций разрабатывались в большом числе за границей и в России. Так, например, в 1892 г. Н. Н. Бенардос предложил организовать электроснабжение Петербурга путем утилизации энергии р. Невы на специально построенных электрических станциях (мощностью до 20 тыс. л. с.). В 1894 г. идея широкого использования водных источников энергии нашла свое отражение в труде П. Д. Войнаровского «Электрическая передача силы на расстояние переменным однофазным и многофазным током». В 1893 г. Н. С. Лелявский дал схему использования гидроэнергии Днепровских порогов, а в 1894 г. В. Ф. Добротворский — проект использования энергии порожиистой части рр. Волхова, Наровы и Вуоксы для электроснабжения Петербурга. По этому проекту, например, Волховская гидроэлектростанция могла иметь установленную мощность почти 40 тыс. л. с., что являлось громадной цифрой для того времени. В том же году В. Е. Тимоновым был предложен еще один проект использования водной энергии Днепра. В. Н. Чиколев, пропагандировавший еще в начале 80-х годов использование водяных турбин в качестве первичных двигателей электростанций, в 1896 г. совместно с Р. Э. Клас-

соном построил в Петербурге на р. Охте гидроэлектростанцию и электропередачу на трехфазном токе.

Все это показывает, что гидроэнергетика начинала входить в новую фазу своего развития, что обуславливалось успешным решением проблемы передачи энергии на большие расстояния путем применения трехфазного тока. С каждым годом стало возрастать число крупных гидроэлектростанций, первой из которых была Ниагарская гидроэлектростанция в США (1896 г.). В течение 90-х годов прошлого века гидроэнергия стала занимать все более видное место в электроснабжении.

Основные достоинства и преимущества гидроэлектростанций по сравнению с тепловыми электростанциями стали быстро выявляться. Эти преимущества весьма значительны и состоят прежде всего в том, что ГЭС экономят топливо, рационализируют топливный баланс, содействуют экономическому развитию районов, не обеспеченных достаточными топливными ресурсами. Строительство гидроэлектростанций приводит к рациональному решению не только энергетической проблемы, но и ряда других проблем, имеющих крупное народнохозяйственное значение. Среди них — проблемы судоходства, ирригации и мелиорации земель, водоснабжения, рыбного хозяйства и очень важная проблема преобразования природы.

Опыт эксплуатации первых более или менее значительных по масштабу гидроэлектростанций показал, что они имеют большую маневренность, хорошую надежность работы и малые эксплуатационные расходы, требуют небольшого численного обслуживающего персонала и допускают полную автоматизацию процесса производства электроэнергии с весьма широкими возможностями телеуправления. Современные гидравлические турбины обладают к. п. д., достигающим до 0,93. Энергия, производимая гидроэлектростанциями, дешевле, чем электроэнергия, доставляемая тепловыми электростанциями.

В техническом и эксплуатационном отношении очень важным является то, что гидроэлектрические установки обладают большой маневренностью. Эта особенность гидроагрегатов имеет особо существенное значение для крупных энергетических систем, так как резкий прирост нагрузки, в том числе при аварийных условиях в системе, можно быстро компенсировать включением резервных гидроагрегатов. Таким образом, гидроагрегаты оказались очень удобными для покрытия пиков нагрузки в системах,

в которых работают как тепловые, так и гидравлические станции.

Необходимо отметить еще и следующее обстоятельство: конструкция агрегатов гидроэлектрических станций проще, чем агрегатов тепловых электрических станций, а процесс производства электрической энергии на гидростанциях значительно менее сложен, чем на тепловых станциях.

Недостатком гидравлических станций является их «локальность», отмеченная еще Марксом, т. е. возможность эффективного строительства гидростанций только в относительно немногих пунктах. Эта локальность преодолевается передачей энергии на расстояние электрическим током, однако в некоторых случаях транспорт энергии путем перевозки топлива экономически эффективнее, особенно при применении нефтепроводов и газопроводов. Первоначальные затраты на сооружение ГЭС выше, чем на тепловые электростанции.

Современный узел гидротехнических сооружений является сложным комплексом, элементы которого предназначаются для разрешения отдельных энергетических или водохозяйственных проблем. Так, например, плотина служит для создания подпора и пропуска через нее воды, льда и речных наносов; водозаборные устройства предназначены для подачи воды, орошения, водоснабжения и т. п. Шлюзы, плотоходы, бревноспуски, гавани и т. п. являются сооружениями водотранспортного назначения и обеспечивают сохранение и улучшение условий речного транспорта после возведения плотины. Рыбоходы, рыбоподъемы и т. п. устраиваются для сохранения и развития рыбного хозяйства реки, на которой сооружена плотина. Наконец, дамбы и запаны являются регуляционными частями гидроузла, сооружаемыми для направления водного потока на обоих бьефах. Энергетические устройства гидроузла — собственно гидроэлектростанция, ее машинный зал, распределительные устройства, насосные агрегаты и т. п. — служат для производства и распределения электрической энергии.

Гидравлические
ресурсы и их
использование

Постоянная возобновляемость гидравлической энергии за счет энергии излучения солнца давно привлекала к себе внимание. Работы по точному

учету гидроресурсов ведутся непрерывно, но приводят они к приблизительным данным, требующим дальнейшего уточнения. Таким образом, в настоящее время мы еще не располагаем вполне достоверными данными о ресурсах

гидравлической энергии как отдельных стран, так и всего мира в целом. В таблице приводятся результаты подсчетов гидроэнергоресурсов мира, отдельных континентов и СССР (эти данные относятся к энергоресурсам руслового стока).

Энергоресурсы (руслового стока)

Название континента или страны	Млрд. квт·ч	% итоговой цифры по земному шару
Европа	2 100	6,4
Азия	11 750	35,7
Африка	6 150	18,7
Северная Америка . . .	6 150	18,7
Южная Америка	5 250	16,0
Австралия	1 500	4,5
Весь земной шар . . .	32 900	100,0
СССР	3 700	11,4

Приведенные данные показывают богатство гидроэнергетических ресурсов СССР, которые при этом распределены по всем частям страны: гидроресурсы СССР более чем в $1\frac{1}{2}$ раза превосходят гидроресурсы всей Европы. В 1960 г. выработка электроэнергии на гидростанциях будет составлять 59 млрд. квт·ч, т. е. располагаемые нашей страной гидроресурсы пока еще используются в весьма ограниченном масштабе.

Интенсивное использование гидравлических ресурсов, начавшееся в самом конце прошлого века и, следовательно, насчитывающее примерно 60 лет, привело к тому, что в настоящее время используется примерно 15% мировых водноэнергетических ресурсов. Отсюда ясно, что для развития гидроэнергетики в будущем имеется много возможностей. В результате бурного прогресса машиностроения, строительной техники и успехов передачи электрической энергии на расстояние стало возможным сооружать крупные энергетические установки при мощных гидроузлах. Развитие гидроэнергостроительства за последние 60 лет показывает не только рост масштаба и мощности установки, но и непрерывное их совершенствование в механической, электрической и строительной частях. За это время были разработаны методы сооружения гидроэлектростан-

ций в различных географических условиях — для использования энергии высоконапорных горных рек и для низконапорных рек равнинных частей суши. Гидроэнергостроительство ведется как в областях с горным рельефом (Швейцария, Норвегия, юг Франции, Италия), так и в равнинных областях (Сибирь, Украина и Поволжье в СССР, Центральная Франция и другие страны).

Развитие гидроэлектростроительства за рубежом происходило вначале также довольно медленно. Прошло не-

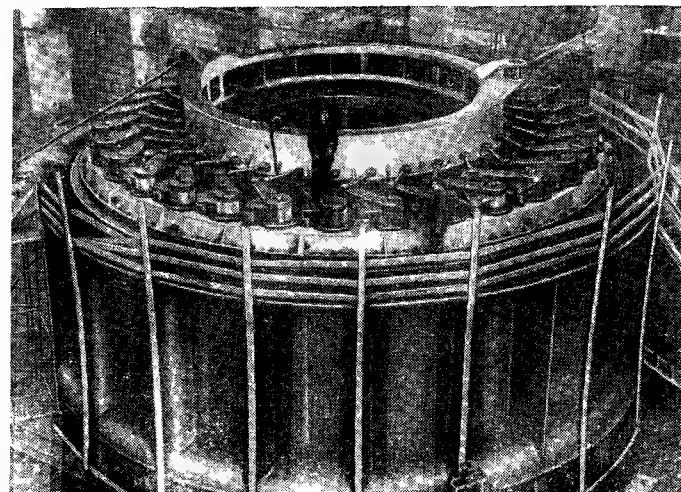


Рис. 11-17. Направляющий аппарат современной крупной гидравлической турбины.

сколько лет после Лауфен-Франкфуртской передачи, пока были сооружены: Рейнфельдская гидроэлектростанция (Германия, 1898 г.) мощностью 16 800 квт при напоре 3,2 м, Ниагарская (США) мощностью 50 тыс. л. с. при напоре 41,2 м, Жонажская (Франция, 1901 г.) мощностью 11 200 л. с. Несколько позже, в начале второго десятилетия нашего века, были пущены в ход гидроэлектростанции: Аугст-Виллен (Германия, 1911 г.) мощностью 44 тыс. л. с., Кеокук (США, 1912 г.) мощностью 180 тыс. л. с. и др. Эти крупные для своего времени электростанции оказались школой для сооружения и освоения гидротехнических устройств. Качество турбинного оборудования этих ГЭС было еще недостаточно высоким, и их к. п. д. колебался

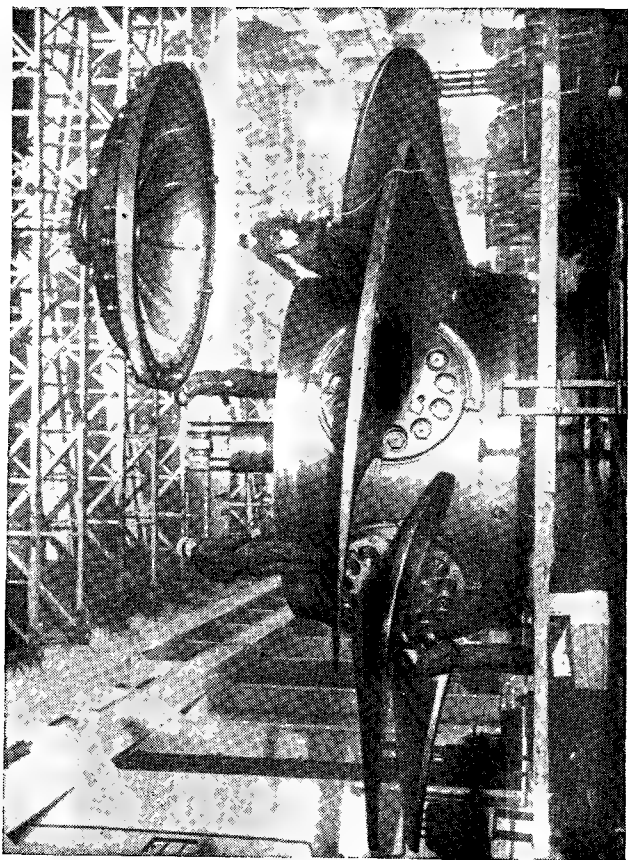


Рис. 11-18. Рабочее колесо крупной современной гидравлической турбины.

в пределах 0,8—0,84. Несовершенными были также и формы и конструкции гидросооружений, что объясняется недостаточной в то время изученностью вопросов инженерной гидравлики и гидротехники. Поэтому некоторые из ГЭС, построенных в эти годы, в последующем подверглись более или менее серьезной реконструкции (в том числе и Ниагарская ГЭС).

На рис. 11-17 и 11-18 представлены крупнейшие гидравлические турбины конца XIX в. и настоящего времени (50-е годы).

В дореволюционной России действовало очень мало гидроэлектростанций. Кроме ранее упомянутой установки на Охтенском заводе в Петербурге мощностью 350 л. с. (1896 г.), в России действовали ГЭС, считавшиеся в свое время крупными: «Белый уголь» на р. Подкумок (сооружена в 1903 г.) мощностью 990 л. с., передававшая энергию в группу Кавказских минеральных вод при напряжении 8 000 в; Гиндукушская ГЭС (пущена в 1909 г.) на р. Мургаб мощностью 1 590 л. с. Кроме этих ГЭС, действовало несколько более мелких по мощности (Сашинская, Аллавердинская, Тургусунская, Сестрорецкая и др.). Общая мощность всех гидроэлектростанций дореволюционной России составляла всего около 8 000 квт.

Главнейшие типы гидроэлектростанций *Деривационные ГЭС.* В них существенная (а иногда и большая) часть напора создается посредством деривационных водоводов, являющихся искусственными сооружениями в виде открытых каналов, лотков, туннелей или трубопроводов. Водяные турбины ставятся на деривационном водоводе. Такие ГЭС подходят для горных рек, и в СССР к этому типу ГЭС относятся Земо-Авчальская (Загэс), Канакирская, Храмская, Фархадская и др.

Приплотинные ГЭС. Они устроены так, что напор в них создается посредством специально сооруженной плотины, которая, подпирая уровень воды, создает верхний бьеф. Здание ГЭС обычно располагается вблизи плотины: вода из водохранилища поступает к турбинам по напорным водоводам, проходящим через тело плотины, либо под плотинной, либо непосредственно из верхнего бьефа. После использования вода из турбин отводится в русло. Для пропуска избытков воды устраиваются особые водосливные плотины. Примером приплотинной ГЭС является первенец гидроэнергетики СССР — Волховская гидроэлектростанция имени В. И. Ленина. К этому типу ГЭС относятся Дне-

провская и ГЭС на Волге: Ивановская, Угличская, Волжская имени В. И. Ленина и др.

Некоторые ГЭС устраиваются так, что в турбинных блоках размещены отверстия для холостых сбросов паводковых вод и подведения воды к турбинам. Эти ГЭС носят наименование совмещенных. В гидроэлектростанциях встроенного типа агрегаты размещаются в теле бетонной плотины, так что необходимость сооружения особого машинного здания отпадает.

В настоящее время с развитием гидроэнергостроительства сооружаются на крупных реках каскады гидроэлектростанций. Ярким примером этого является каскад гидроэлектростанций на Волге, большая часть которого уже сооружена; в этот каскад входят ГЭС: Ивановская, Угличская, Рыбинская, Горьковская, Куйбышевская, Саратовская, Сталинградская.

**Автоматика
и телемеханика
гидроэлектростанций**

На современных средних и крупных гидроэлектростанциях, а также на многих мелких ГЭС широко применяются методы автоматики и телемеханики, причем на некоторых ГЭС полностью автоматизированы пуск, регулирование, управление и остановка агрегатов, а также управление затворами гидросооружений и напорных водотоков. Эти операции могут производиться телемеханически, т. е. диспетчерским персоналом пунктов управления. Ряд вспомогательных устройств в машинном здании снабжается аппаратурой для полной автоматизации, как-то: маслonaпорные установки, пневматическая аппаратура, производственное водоснабжение и другие общестанционные устройства. Многие ГЭС работают совершенно без персонала, управляются на расстоянии (например, с другой станции каскада либо с диспетчерского пункта). На отдельных автоматизированных ГЭС управление и поддержание нужного режима работы осуществляются при помощи автооператоров, выполняющих свои функции по заранее намеченным для них плану и последовательности. На полностью автоматизированных ГЭС, управляемых дистанционно или посредством автооператоров, надзор за оборудованием осуществляется путем периодических инспекторских осмотров ГЭС. При какой-либо аварии подается сигнал дежурному для восстановления нормального режима работы ГЭС. В условиях социалистического хозяйства возможно одновременное централизованное управление как ГЭС, так и тепловыми станциями системы.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И СИСТЕМ

12-1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ РАЙОННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Современный этап развития комплексной энергетики характеризуется созданием крупных энергетических систем. Под энергетической системой обычно понимают совокупность электростанций, линий электропередачи, подстанций и тепловых сетей, связанных общностью режима и непрерывностью процесса производства и распределения электрической и тепловой энергии. Схема, приведенная на рис. 12-1, может дать представление об энергетической системе и примерном распределении энергии между электростанциями и видами потребления.

Выше (см. гл. 6 и 8) были изложены история возникновения и развития электростанций постоянного и однофазного переменного токов, а также история возникновения электростанций трехфазного тока. При этом неоднократно отмечалась в качестве одного из недостатков, присущих всем ранним электростанциям постоянного тока, необходимость сооружения их в центрах промышленных и жилых районов.

Изучение вопросов экономичности работы электростанций, которым стали придавать все большее и большее значение по мере роста числа и мощности станций, показывало, что перевозка по железным дорогам топлива, особенно его низкоторийных сортов, оказывалась экономически невыгодной. Во всех отношениях удобнее было строить крупные электростанции на месте добычи топлива, на водопадке или на крупной реке, а вырабатываемую энергию транспортировать по линиям электропередачи в промышленные районы и города. Техника трехфазного тока позволяла полностью решить эту проблему. Такие электростанции, расположенные непосредственно у источников энергии, стали называть районными.

Первые районные электростанции были построены во второй половине 90-х годов прошлого столетия, а в текущем столетии они составили основу развития электроэнергетики. Приведем примеры наиболее значительных по своей роли в истории электростроительства и по своим параметрам районных электростанций.

Первой районной электростанцией обычно считают

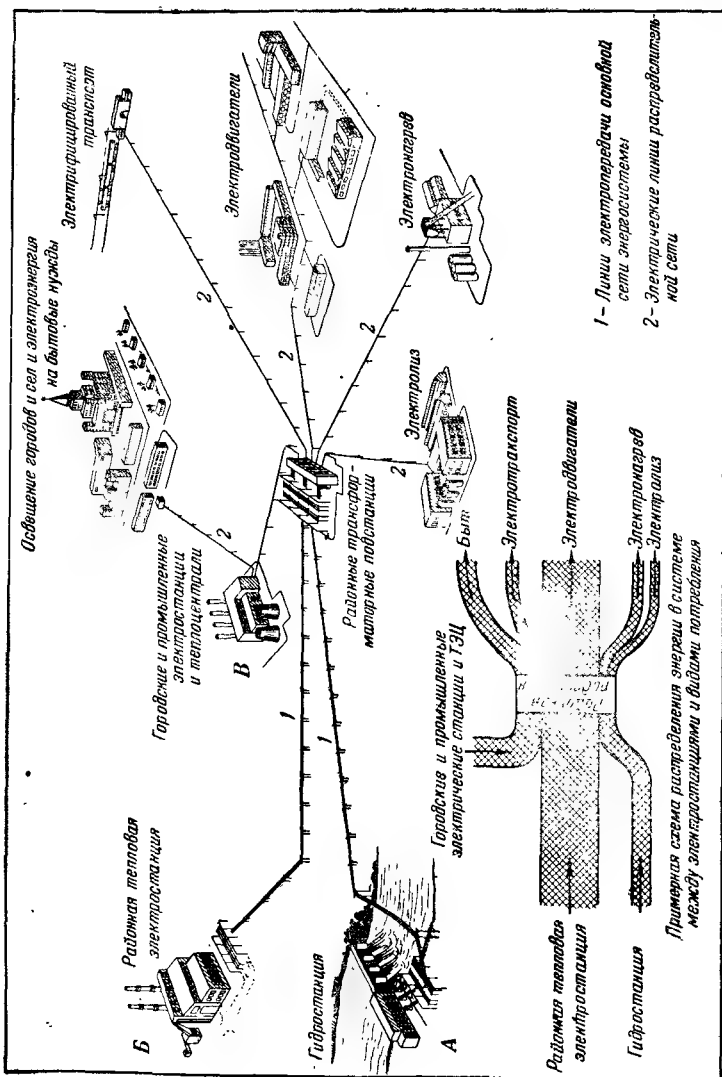


Рис. 12-1. Схематическое изображение энергосистемы и распределения энергии между электростанциями и потребителями.

упоминавшуюся выше (см. гл. 8) Ниагарскую ГЭС. Знаменитый водопад издавна привлекал внимание инженеров и ученых, составлявших порой полуфантастические проекты использования энергии, заключенной в массах низвергавшейся воды. В последней трети прошлого века стали разрабатываться проекты электрической передачи энергии Ниагарских водопадов. В 1889 г. была образована компания «Cataract Construction Co.», которая приобрела право использования 450 000 л. с. и на реальной основе приступила к подготовке строительства гидроэлектростанции. Совещание крутых инженеров и ученых, созданное для обсуждения вариантов проектов будущей станции, согласилось с предложением о применении двухфазного тока (система Тесла).

Воодушевленные успехами Лауфен-Франкфуртской электропередачи, руководители новой компании энергично принялись за строительство станции. Фирме Вестингауз Электрик были заказаны три двухфазных генератора по 5 000 л. с. каждый с напряжением на зажимах 2 400 в, а другой фирме — гидротурбины по 5 150 л. с. В короткий срок были выполнены большие строительные работы, и в ноябре 1896 г. невиданная до тех пор по размерам и мощности электростанция была открыта.

Еще в период строительства Ниагарской ГЭС выяснилось, что спрос на электроэнергию в этом районе будет очень велик и проектная мощность станции окажется недостаточной. Поэтому сразу же началось расширение станции, и к началу текущего столетия число агрегатов было увеличено до восьми, а общая мощность возросла до 40 000 л. с. На рис. 12-2 показан машинный зал Ниагарской гидроэлектростанции, который выглядит вполне современным.

Пример Ниагарской электростанции показывает, что с первых шагов крупного гидроэлектростроительства дешевая энергия гидроэлектростанций получила широкое применение для электрохимических и электротермических производств, т. е. там, где электроэнергия играет роль основного технологического фактора. Так, первыми основными потребителями электроэнергии Ниагарской ГЭС стали заводы по производству карборунда (потребляемая мощность 2 000 л. с.), алюминия (3 000 л. с.), карбида кальция (до 15 000 л. с.) и др. Часть энергии при напряжениях 11 или 22 кв передавалась в г. Буффало, Тонаванда и Локпорт.

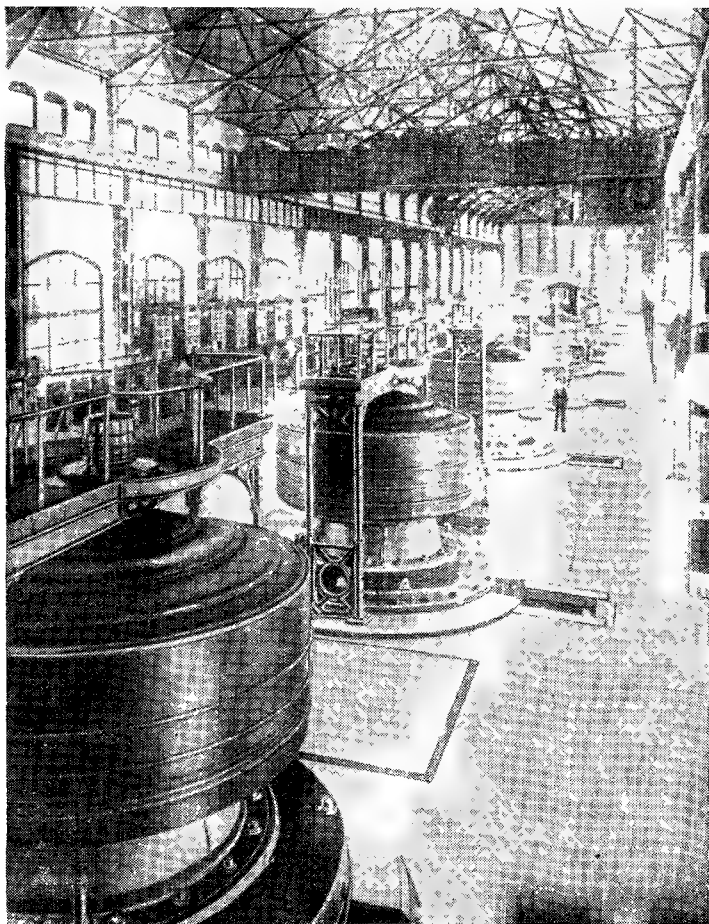


Рис. 12-2. Машинный зал Ниагарской гидроэлектростанции.

В последние годы прошлого столетия было сооружено еще несколько крупных районных электростанций, таких, например, как станция Обершпрее близ Берлина (1897 г.) или Рейнфельдская ГЭС (1898 г.). Но действительно широкий размах строительство районных электростанций приобрело с начала XX в.

Быстрому развитию электростроительства на рубеже XIX и XX вв. способствовал ускорившийся рост потребления электроэнергии, связанный с внедрением в промыш-

ленность электропривода, развитием электрического транспорта и расширением масштабов электрического освещения городов.

Электрическое освещение из предмета роскоши теперь уже превращалось в необходимый элемент производства и быта. Распространению электрического освещения способствовали также многие крупные пожары, возникавшие в конце прошлого столетия в результате применения газового освещения (особенно частые пожары в театрах и других общественных зданиях).

Число и мощность районных электростанций быстро возрастали. Еще до первой мировой войны электростанции мощностью в несколько десятков тысяч киловатт становились обычным явлением (например, станция Гольденберг в Германии с четырьмя агрегатами по 15 000 кВт), а после войны мощность станций перешагнула за 100 000 кВт. Так, в 1921—1922 гг. в 6 км от Парижа была построена районная электростанция «Женевилье»; мощность ее первой очереди составила 200 000 кВт, но было предусмотрено расширение до 320 000 кВт. В середине 20-х годов в США была построена электростанция «Ист-Ривер» с тремя агрегатами по 60 тыс. кВт, а на немецкой станции «Клингенберг» (1927 г.) были установлены три агрегата по 80 тыс. кВт. Современные крупные районные электростанции (см. гл. 11) имеют мощность, превышающую 2 млн. кВт.

В России первой станцией, которую можно отнести к числу районных, была небольшая гидроэлектростанция «Белый уголь» (близ г. Ессентуки), построенная в 1903 г. Эта электростанция по четырем воздушным трехфазным линиям протяженностью 6—20 км питала города минераловодской группы.

Единственной крупной районной электростанцией дореволюционной России была станция «Электропередача» в г. Богородске (ныне г. Ногинск), сооруженная на средства «Общества электрического освещения 1886 г.» Руководителем строительства станции и ее сети был Р. Э. Классон. На станции (рис. 12-3) были установлены три турбогенератора по 5 000 л. с., 1 500 об/мин, 6 600 в, 50 гц. Напряжение повышалось при помощи трансформаторной группы до 70 кв. Линия передачи Богородск — Москва имела протяженность более 70 км, и в конце ее, в Измайлове (Москва), была построена понижающая подстанция. В Москве, на территории б. завода Гужона (ныне завод

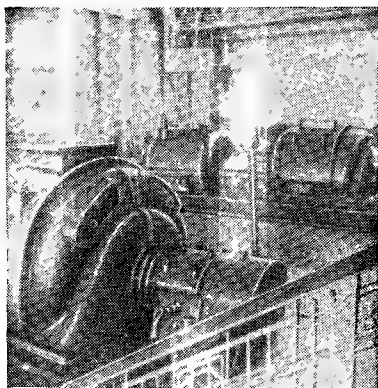


Рис. 12-3. Машинный зал электростанции имени Р. Э. Классона.

«Серп и молот») линия Измайловской подстанции была соединена с городской сетью несколькими кабелями. Так, в Москве была создана первая, еще несовершенная энергетическая система, включающая в себя две электростанции (на Раушской наб. и в Богородске), сети которых были соединены на их периферии.

Богородская электростанция, сданная в эксплуатацию в 1914 г. явилась для своего времени самой крупной в мире электро-

станцией на торфе. Эта станция питала электроэнергией важнейшие предприятия Москвы в тяжелые годы гражданской войны. После Великой Октябрьской социалистической революции в СССР крупные районные электрические станции стали основным звеном электрификации.

В 1922 г. была пущена первая очередь Каширской ГРЭС (рис. 12-4), которая имела два турбоагрегата по 6000 кВт. Через 3 года была введена в строй Шатурская ГРЭС с турбогенераторами по 16000 кВт. В декабре 1926 г.



Рис. 12-4. Внешний вид Каширской ГРЭС.

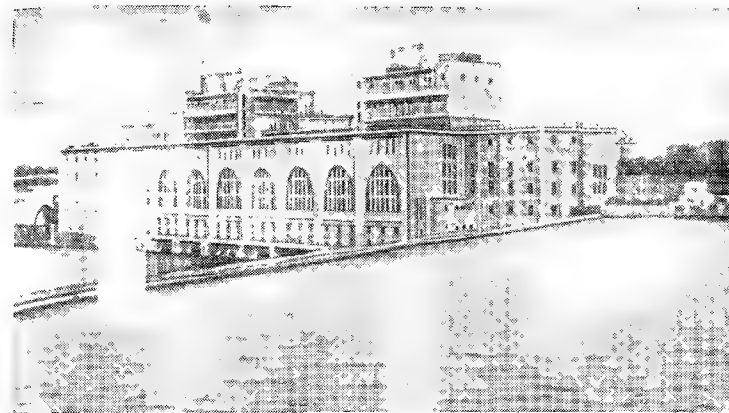


Рис. 12-5. Внешний вид Волховской ГЭС.

была торжественно открыта Волховская ГЭС — первенец советского гидростроительства (рис. 12-5) — с восемью агрегатами по 7,25 тыс. кВт. Крупнейшей гидроэлектростанцией до Великой Отечественной войны была, как указывалось выше (см. гл. 10), Днепровская ГЭС имени В. И. Ленина (560 тыс. кВт), а тепловой — Сталиногорская ГРЭС (400 тыс. кВт), на которой в 1938 г. впервые в СССР был установлен турбогенератор мощностью 100 тыс. кВт.

В настоящее время в нашей стране строятся тепловые и гидравлические электростанции мощностью 1 млн. кВт и выше. Примерами таких станций могут служить Южно-Уральская ГРЭС (рис. 12-6), на которой вслед за четырьмя агрегатами по 50 тыс. кВт и четырьмя агрегатами по 100 тыс. кВт устанавливаются два агрегата по 200 тыс. кВт, и Волжская ГЭС имени В. И. Ленина (рис. 12-7), на которой работают 20 гидрогенераторов по 115 тыс. кВт каждый.

На рис. 12-8 приведена схема основного электрического оборудования электрической станции. Рассмотрим важнейшие этапы развития основных схем станций, конструкций распределительных устройств и релейной защиты.

Основные схемы
электрических
соединений
электростанций

На ранних электростанциях постоянного или переменного тока осуществлялись простейшие схемы электрических соединений. В случае станций переменного тока, как указывалось выше (см. гл. 6), вначале все генераторы работали изолированно друг от друга, т. е. каждый генератор питал че-

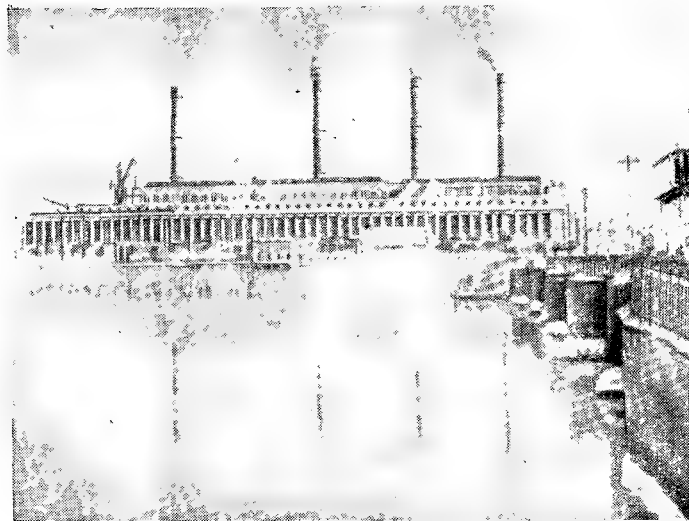


Рис. 12-6. Внешний вид Южно-Уральской ГРЭС.

рез отдельную линию с простейшими приборами свою группу потребителей. Такое необеспеченное резервом электроснабжение объяснялось главным образом тем, что еще не выяснены были в достаточной степени условия параллельной работы машин переменного тока.

Иным было положение на станциях постоянного тока. Уже на первых электростанциях осуществлялась параллельная работа машин (рис. 12-9). Генераторы присоединялись к сборным шинам, от которых отходили основные



Рис. 12-7. Волжская ГЭС имени В. И. Ленина.

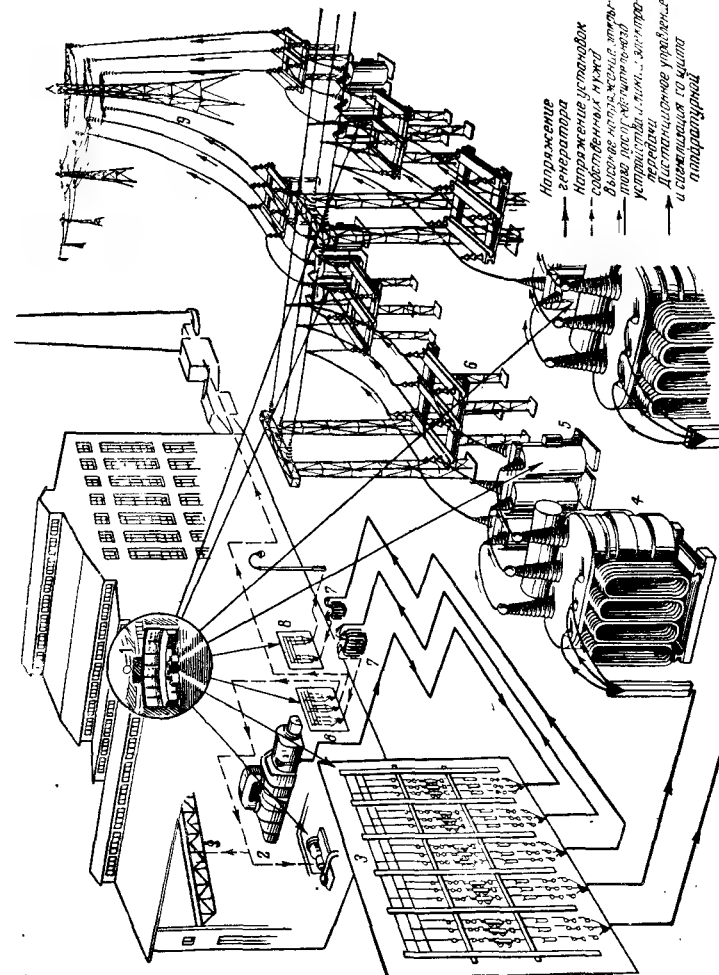


Рис. 12-8. Схема основного электрического оборудования, электростанции.

1 — щит управления; 2 — турбогенератор; 3 — распределительные устройства генераторного напряжения; 4 — повысительные трансформаторы; 5 — групповые часыные выключатели; 6 — трансформаторы разделения; 7 — трансформаторы собственных нужд; 8 — распределительные устройства собственных нужд; 9 — линия электропередачи.

питающие линии. В цепь каждого генератора обычно включали плавкие предохранители, разъединители и амперметры. На отходящих линиях были установлены плавкие предохранители. Для включения генераторов на параллельную работу были предусмотрены два вольтметра: один измерял напряжение на шинах, другой — на зажимах генераторов. Минимальный автоматический выключатель ставился на одном из полюсов машины на тот случай, если

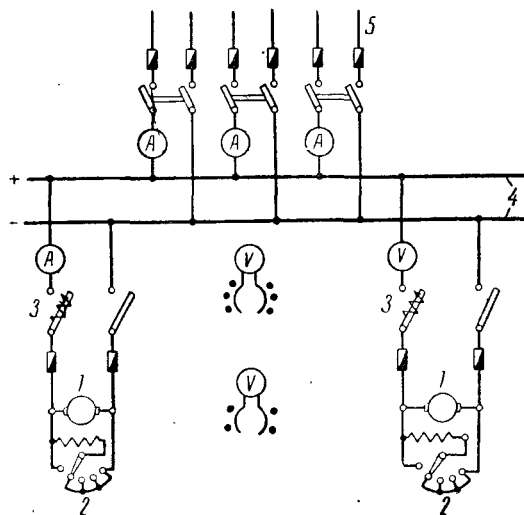


Рис. 12-9. Схема электрических соединений станции постоянного тока.

1 — генераторы с параллельным возбуждением; 2 — регулировочные реостаты; 3 — минимальные автоматические выключатели; 4 — сборные шины; 5 — отходящие линии.

ток, даваемый машиной в сеть, почему-либо упадет ниже определенной величины. Другой полюс присоединялся к шинам через обычный однополюсный рубильник.

В тех случаях, когда на электростанциях работали генераторы со смешанным возбуждением (компаундные машины), а это делалось при резких колебаниях нагрузки, особенно на трамвайных электростанциях, помимо основных двух сборных шин, монтировалась еще третья, уравнительная, шина, необходимая для осуществления устойчивой параллельной работы машин.

Наконец, третьей основной разновидностью схем электрических соединений электростанций постоянного тока

являлась схема станции с аккумуляторной батареей (рис. 12-10). В этом случае к основным сборным шинам добавлялась зарядная шина, а к основной аппаратуре — переключатель, позволяющий переключать генератор на

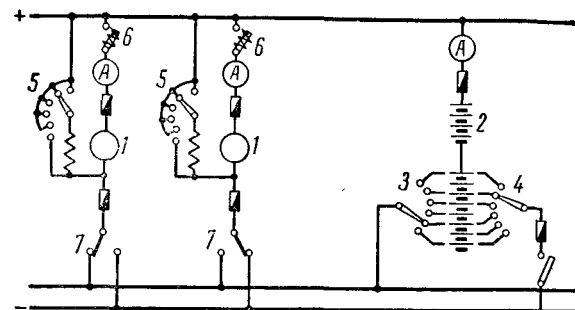


Рис. 12-10. Схема электрических соединений электростанции с аккумуляторной батареей.

1 — генераторы с параллельным возбуждением; 2 — аккумуляторная батарея; 3 — зарядный коммутатор; 4 — разрядный коммутатор; 5 — регулировочные реостаты; 6 — минимальные автоматические выключатели; 7 — переключатель зарядной шины.

сборную или зарядную шину, и двойной элементный коммутатор, позволяющий при зарядке батареи от одного генератора питать нагрузку от другого генератора и батареи.

На электростанциях, построенных в более позднее время, главным образом на станциях трехфазного тока, получили применение разнообразные схемы основных электрических соединений.

Вначале в распределительных устройствах на станциях и подстанциях применялась логически возникающая простейшая схема с одной системой сборных шин. Такая схема в однолинейном изображении широко известна и представлена на рис. 12-11. Однако из-за очевидных недостатков этой простейшей схемы (отключение всей станции при ремонтах сборных шин и шинных разъединителей и корот-

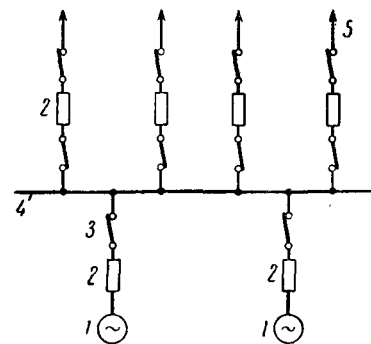


Рис. 12-11. Схема с одной системой сборных шин.

1 — генераторы; 2 — выключатели; 3 — разъединители; 4 — сборные шины; 5 — отходящие линии.

ких замыканиях) она быстро стала вытесняться другими схемами и сохранила свое значение до настоящего времени лишь в электроустановках малой мощности (обычно с одним источником питания).

Представляет интерес вопрос о применении выключателей в схемах электрических станций. Вначале, когда выключатели еще не предназначались для отключения токов коротких замыканий, при возникновении трудности с отключением токов высоких напряжений появлялась тенденция обойтись вообще без выключателей. Так поступали М. Дебре, Р. Тюри и другие инженеры. Затем на электростанциях переменного тока выключатели стали устанавливать только со стороны генераторного напряжения, а линия присоединялась к трансформаторам «в блок», т. е. без выключателей. По такой схеме работала электропередача Лауфен—Франкфурт, а в более позднее время—линия Богородская станция—Москва. Однако необходимость осуществлять промежуточные отборы электроэнергии заставила вдоль трассы линии сооружать подстанции и применять отключающие аппараты высокого напряжения в распределительных устройствах как станций, так и подстанций.

Примерно до начала второго десятилетия текущего столетия (в России — до 1912 г.) наиболее часто использовалась схема с одной системой сборных шин, секционированной выключателями и разъединителями. Принципиальная схема такого рода без дальнейших пояснений представлена на рис. 12-12.

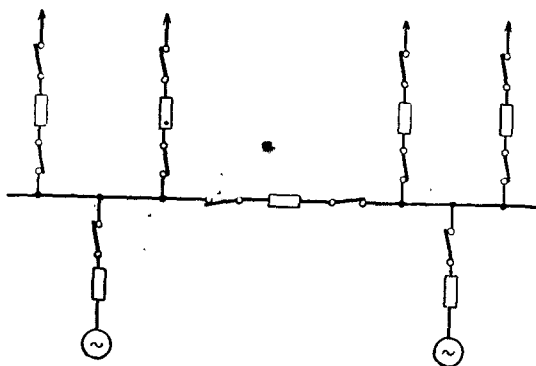


Рис. 12-12. Схема с одной системой сборных шин.

Преимущественное распространение как весьма гибкая и надежная получила схема с двумя системами сборных шин при одном выключателе на цепь (рис. 12-13). В России впервые такая схема была введена в 1912 г. на московской электростанции «Общества 1886 г.» (ныне 1-я МГЭС). Позднее пытались неоднократно вернуться к одной секционированной системе сборных шин на генераторном и повышенном напряжениях вплоть до 110 кВ. Но все же преобладающей явилась схема с двумя системами шин,

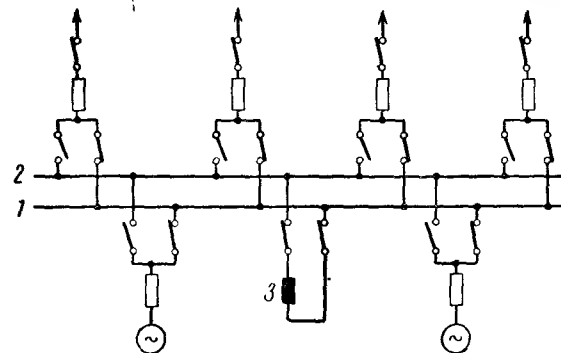


Рис. 12-13. Схема с двумя системами сборных шин.

1—рабочая система шин; 2—резервная система шин; 3—шинно-соединительный выключатель.

которая была очень удобна для испытаний поврежденного оборудования, легко приспосабливалась к различным требованиям эксплуатации и не представляла затруднений для последующего развития станции и системы. Правда, эта схема усложняла эксплуатацию и нередко являлась причиной ошибочных действий персонала.

В 20-х годах для ограничения токов короткого замыкания стали применять реакторы — катушки с большим индуктивным и очень малым активным сопротивлением.

В установках повышенного напряжения в последние десятилетия нередко применяют экономичные схемы моста и четырехугольника. Для распределительных устройств 220 кВ была принята схема с двумя выключателями на цепь и двумя системами сборных шин, но затем в целях экономии дорогостоящих выключателей и в этом случае стали обращаться к привычной типовой схеме с двумя системами шин и одним выключателем на цепь. В последнее время для ряда подстанций и на гидроэлектростанциях (напри-

мер, на Каховской ГЭС) стали вновь выбирать более простую в эксплуатации схему с одной системой сборных шин, которая благодаря принятым мерам (секционирование выключателями, применение автоматического повторного включения и др.) стала достаточно надежной.

Таким образом, до настоящего времени в выборе схем основных электрических соединений электростанций и подстанций нет единообразного решения, продолжается борьба мнений, ведутся экономические расчеты и крупные эксперименты.

Схемы собственных нужд электростанций Известно, что каждая электростанция должна снабжать электроэнергией не только внешних, но и своих собственных потребителей, или, как говорят, снабжать энергией собственные нужды (двигатели насосов, дымососов, углеразмольных мельниц, двигатель-генераторы для зарядки аккумуляторов батарей, освещение и т. п.). Электроснабжение собственных нужд всегда являлось предметом особой заботы инженеров, ибо отключение собственных нужд неизбежно ведет к остановке работы всей электростанции.

Для электростанций 90-х годов прошлого и первых 10—15 лет текущего столетия характерным было децентрализованное снабжение собственных нужд, когда в соответствующих цехах электростанции устраивались «сборки» — местные распределительные устройства, от которых через плавкие предохранители питались двигатели. Сами «сборки» соединялись с общими шинами станции и лишь в некоторых случаях для питания собственных нужд выделялся отдельный генератор.

В дальнейшем, как правило, стали создавать центральное распределительное устройство собственных нужд с двумя (а в последнее время с одной) системами сборных шин (секционированными или не-секционированными). Некоторое время (20-е и 30-е гг.) довольно широко применялись электроснабжение собственных нужд от отдельных генераторов и привод основных механизмов от резервных паровых двигателей. Но в настоящее время в связи с повышением надежности электроснабжения отдельные генераторы (их называли «домашними») практически уже не применяются и резко сократилось применение резервных паровых двигателей.

На наших электростанциях питание собственных нужд осуществляется от общей сети: от сборных шин генераторного напряжения (или через ответвления от блоков генератор — трансформатор). Определенная ненадежность этой схемы при коротких замыканиях во внешней сети была в значительной степени компенсирована внедрением метода самозапуска двигателей после короткого замыкания. Этот метод был разработан и внедрен в практику в 30-х годах советскими инженерами, которые показали, что нецелесообразно отключать ответственные двигатели от сети при понижениях напряжения (например, при коротком замыкании во внешней сети). Оказывается, что как только после отключения аварийного участка будет восстановлено напряжение на шинах станции, снизившие свою скорость или даже остановившиеся двигатели самостоятельно разворачиваются. При этом не возникает опасности для двигателей, потому что при одновременном запуске многих двигателей их пусковые токи не превышают допусти-

мых значений. Интересно отметить, что метод самозапуска двигателей, ставший обязательным в системе собственных нужд электростанций, завоевывает себе все большее признание и в промышленности для двигателей-потребителей. Для повышения надежности работы двигателей собственных нужд в случае снижения частоты в системе один из генераторов может быть автоматически отделен от системы и переключен на питание собственных нужд и лишь части нагрузки.

Конструкции распределительных устройств

Важным элементом каждой электростанции и подстанции является электрическая установка, предназначенная для приема и распределения электроэнергии и называемая распределительным устройством.

Первые электростанции имели весьма скромное оборудование, и на некоторых из них отсутствовали даже измерительные приборы. Критерием правильности работы таких станций являлся накал ламп, и по нему регулировали напряжение машин.

В процессе дальнейшего совершенствования электростанций было предложено много конструктивных решений. На некоторых станциях выключатели, реостаты, измерительные приборы и основная проводка были смонтированы непосредственно на деревянной стене. На рис. 12-14 по-

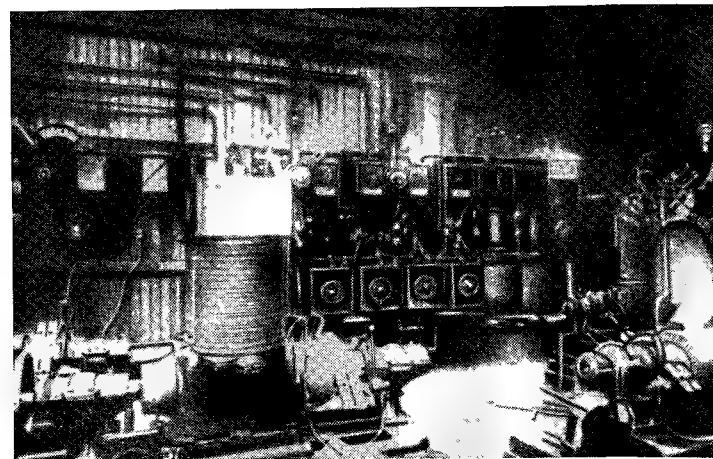


Рис. 12-14. Внутренний вид электростанции начала 80-х годов. Виден монтаж оборудования на стене. На переднем плане — двухполюсные генераторы Эдисона.

казан внутренний вид одной из таких станций, построенной в начале 80-х годов. Однако на некоторых станциях уже в 80-х годах стали создавать простейшие распределительные устройства в виде распределительных щитов. Чаще всего это была обычная деревянная доска, на которой монтировались приборы. Отсюда появился распространенный в мировой электротехнической литературе термин «распределительная доска». Примером такой «распределительной доски» может служить устройство, показанное на рис. 12-15 и предназначенное для двух генераторов постоянного тока и четырех отходящих линий. Распределительное устройство одновременно являлось и щитом управления.

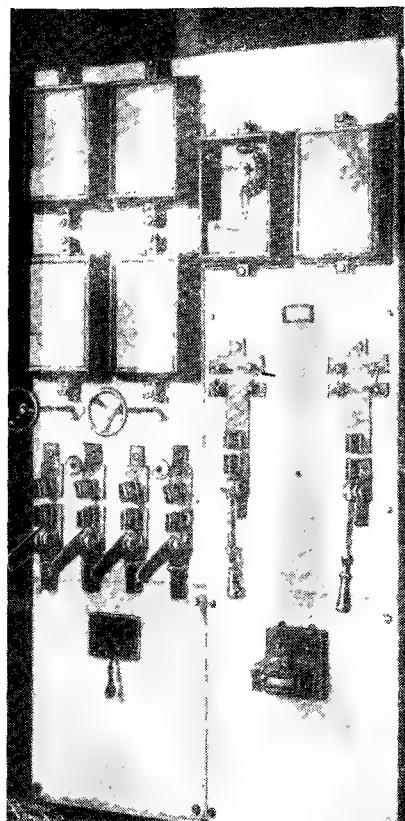


Рис. 12-15. Распределительная доска электростанции постоянного тока.

Вскоре деревянные доски были заменены мраморными или шиферными панелями, число которых на каждой станции очень быстро возрастало. Высокая стоимость таких панелей заставила искать иную конструкцию, и в 20-х годах текущего столетия стали применять стальные щиты управления.

Рост напряжений на электростанциях заставил в целях безопасности персонала переместить приборы и аппараты с лицевой стороны распределительного щита на его заднюю сторону. На лицевой стороне щита остались лишь шкалы утопленных измерительных приборов и рукоятки рубильников и других подвижных элементов. Но рост мощностей и развитие схем станций привели к тому, что ко-

личество и размеры распределительной аппаратуры возрастали, ей становилось тесно за щитом и приходилось искать для нее место этажом ниже или этажом выше. Вместе с этим удаление аппаратуры от щита потребовало разработки новых конструктивных элементов: специальных рукояток, а затем — специальных приводов.

Распределительные щиты на электростанциях обычно размещались непосредственно в машинном зале, даже на таких крупных для своего времени электростанциях, как Богородская станция «Электропередача» (1914 г.). Однако стремление сделать более спокойной ответственную работу дежурного у распределительного щита привело сначала к отделению щита перегородкой (например, стеклянной) от шумного машинного зала, а затем к выделению для распределительного устройства отдельного помещения. Теперь уже распределительное устройство и пост управления находятся в отдельном здании на довольно значительном расстоянии от агрегатов.

Распределительные устройства генераторного напряжения с первых десятилетий XX в. стали приобретать определенные конструктивные формы, удобные и по возможности безопасные в эксплуатации. На рис. 12-16 показана конструкция распределительного устройства 2 кв для схемы с одной системой сборных шин (Московская электростанция «Общества 1886 г.», ныне 1-я МГЭС, 1908 г.).

Конструкции распределительных устройств приспосабливались к типам и особенностям выключателей. Пока отключаемые мощности были невелики и применялись выключатели с разрывом дуги в воздухе, распределительные устройства имели легкие строительные конструкции, часто без перегородок между ячейками. Взрывоопасность масляных выключателей заставила утяжелить конструкцию зданий; для выключателей во втором десятилетии текущего столетия стали строить взрывные камеры из кирпича и бетона. Применение сборных конструкций до начала 20-х годов большого распространения не получило. На рис. 12-17 показан пример конструкции распределительного устройства 6 кв со взрывными камерами для схемы с двойной системой шин (1930 г.). Устройства со взрывными камерами в 30-х годах стали типичными в нашей стране для напряжений 6, 10 и 35 кв. Даже после того как промышленность стала выпускать малообъемные горшковые выключатели, которые практически не взрываются, еще некоторое время продолжали строить распределительные

тельные устройства со взрывными камерами, так как трудно было заранее предвидеть, какие выключатели будут установлены на той или иной станции.

В послевоенные годы в распределительных устройствах стали широко применяться малообъемные выключатели, позволившие существенно упростить строительную часть здания путем использования сборных конструкций.

Наконец, в последние десятилетия весьма прогрессивным явлением в развитии электростроительства стало применение комплектных распределительных устройств. Эти

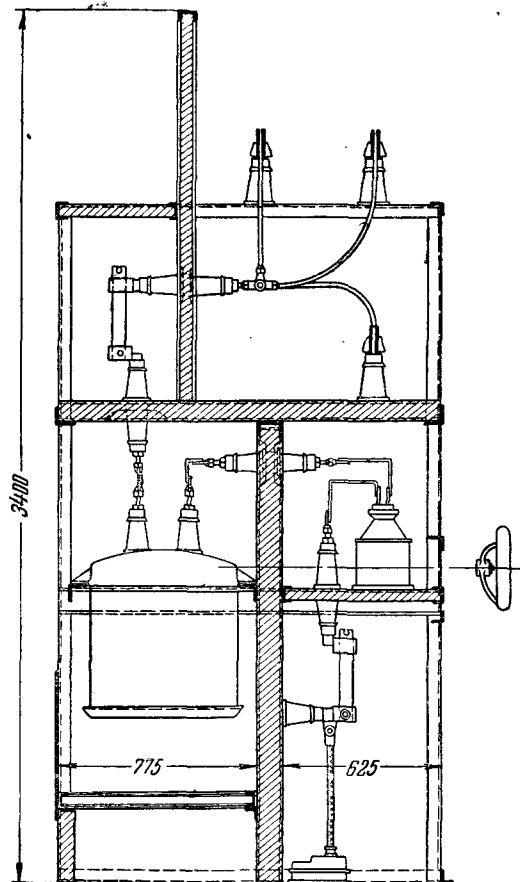


Рис. 12-16. Распределительное устройство 2 кВ для схемы с одной системой сборных шин.

устройства представляют собой металлические ящики, в которых на заводе монтируются аппаратура высокого напряжения и аппаратура управления. На месте строительства электростанции остается лишь установить готовое распределительное устройство, состоящее из такого

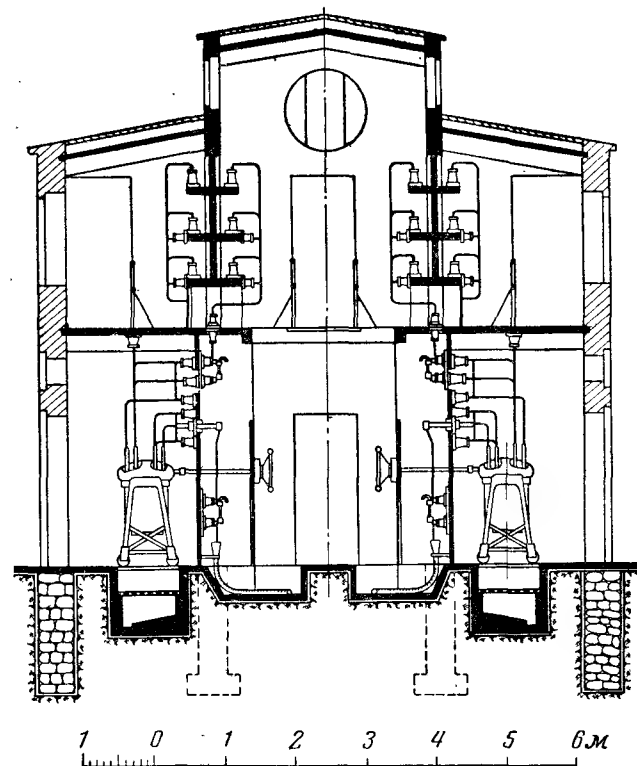


Рис. 12-17. Распределительное устройство 6 кВ со взрывными камерами.

числа ящиков, которое соответствует числу ячеек. В настоящее время комплектные распределительные устройства применяются для напряжений 6—10 и даже 35 кВ для установки на открытом воздухе. На рис. 12-18 показана ячейка комплектного распределительного устройства 10 кВ.

Распределительные устройства повышенного напряжения (35 кВ и выше) вначале тоже сооружались закрытого

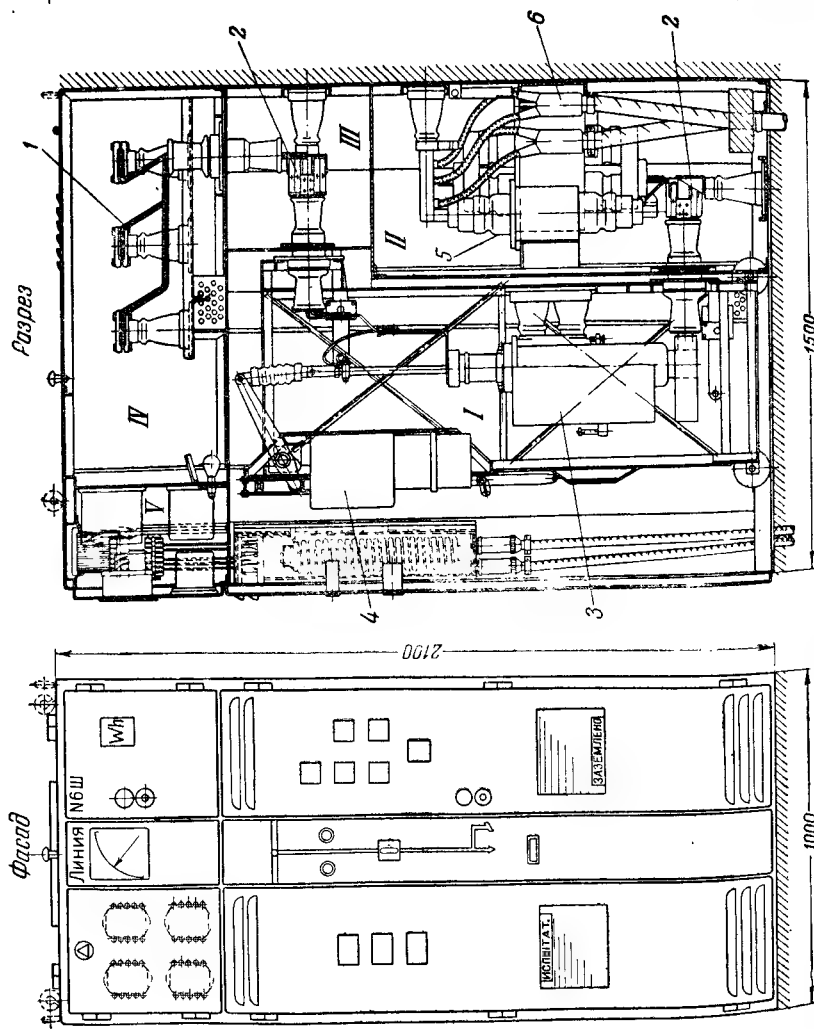


Рис. 12-18. Комплект-
ное распределитель-
ное устройство 10 кв.

типа. Ячейки устройства в одних случаях отделялись одна от другой перегородками, а в других такие перегородки отсутствовали (зальный тип). На рис. 12-19 показано распределительное устройство 66 кв одной из американских станций начала текущего столетия. Здесь хорошо видны металлические конструкции, на которых монтировалось оборудование, амперметры, установленные на проходных изоляторах (слева), масляные выключатели (на переднем

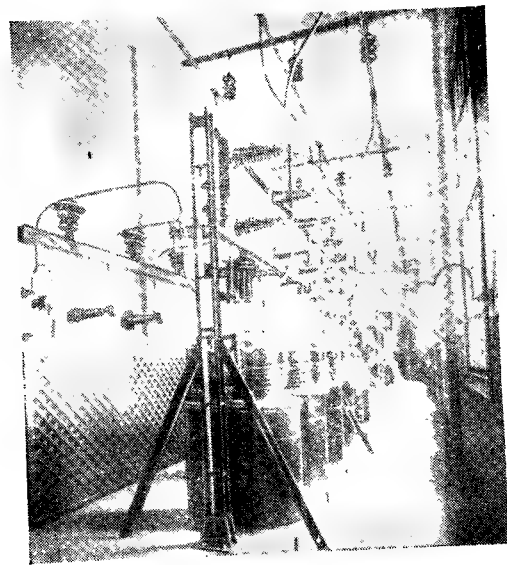


Рис. 12-19. Распределительное устройство 66 кв зального типа.

плане) с серийным максимальным расцепляющим устройством и расположенный в том же помещении (в конце зала) электролитический тип грозового разрядника. Неудобства такого распределительного устройства в отношении безопасности персонала не нуждаются в дополнительных пояснениях.

С ростом напряжений чрезмерно возрастали объем и стоимость строительной части распределительных устройств. Поэтому сначала в Америке, а в 20-х годах и в Европе стали строить открытые распределительные устройства. Выказывавшиеся опасения в отношении быстрого загрязнения оборудования, его коррозии и действия гололеда на разъединители и другие элементы

устройств, находящихся на открытом воздухе, в большинстве случаев оказались преувеличенными.

В СССР вначале все распределительные устройства, даже на 110 кВ, выполнялись закрытыми, и только в 30-х годах открытые распределительные устройства 110 кВ стали обычным явлением в практике отечественного электростроительства. В настоящее время открытые распределительные устройства выполняются на напряжения от 6 (главным образом от 35) до 400 кВ.

Защита электрооборудования В современных электроэнергетических системах очень важную роль играет техника защиты электрооборудования электрических станций и сетей от разрушений, которые могут наступить при повреждении какого-либо элемента установки или нарушении нормальной работы. Эта защита главным образом осуществляется при помощи реле, которые воздействуют на выключатели или приводят в действие сигнальное устройство.

До начала текущего столетия практически единственным устройством, предназначенным для защиты электрооборудования от чрезмерно больших токов, являлись плавкие предохранители. Выключатели в то время применялись только для отключения токов нагрузки, а токи коротких замыканий должны были отключать плавкие предохранители, устанавливавшиеся последовательно с выключателями. Плавкий предохранитель — это самое раннее и достаточно надежное устройство, применявшееся на напряжения до 6 кВ, — имел существенный недостаток: при коротком замыкании на одной из цепей могли отключиться в неповрежденные цепи. Иначе говоря, плавкие предохранители не обеспечивали селективного отключения оборудования. Вторым существенным недостатком плавких предохранителей является то, что они ограничивали рост мощностей электрических установок: известно, что чем больше мощность установки, тем больше и величина вероятных токов коротких замыканий. Эти токи со временем настолько возросли, что плавкие предохранители уже не могли их отключать.

В 90-х годах XIX в. в некоторых случаях начали применять сначала максимальные автоматические выключатели, а затем максимальные электромагнитные реле, которые настраивались на определенные значения токов. Если ток превышал эти значения, то электрическая цепь выключателем разрывалась.

В течение первых двух десятилетий текущего столетия получило применение уже несколько типов реле: токовые, напряжения и направления мощности. Была найдена возможность устанавливать определенные выдержки времени для тех или иных реле и согласовывать уставки реле (значения тока, напряжения и выдержек времени).

В течение последних трех десятилетий было разработано множество конструкций реле и схем релейной защиты. Для развития релейной защиты всегда характерной была борьба двух противоположных тенденций: усовершенствование и почти неизбежное при этом усложнение защит с целью локализации и устранения любых аварий и вместе с тем максимальное упрощение и удешевление защит.

На электрических станциях для релейной защиты (равно как и для цепей автоматики и управления) создаются специальные оперативные цепи, которые в целях большей надежности питаются от отдельных источников тока. До настоящего времени преимущественное распространение имеет постоянный оперативный ток, и это обстоятельство объясняет наличие на современных электростанциях аккумуляторных батарей и преобразовательных агрегатов. Однако по технико-экономическим соображениям представляет определенный интерес применение оперативного переменного тока, т. е. тока, который получается от защищаемых цепей. Если на ранних этапах релейной защиты переменный оперативный ток применялся очень редко, то в последнее время стремление к повышению надежности, удешевлению и упрощению защит приводит ко все более и более широкому использованию этого рода тока.

Наконец, следует отметить еще одну тенденцию в развитии релейной защиты. Речь идет о развитии релейных устройств, основанных на применении нелинейных элементов электрических цепей: насыщенных стержней, электронных ламп и полупроводниковых элементов. Еще в 1911 г. в Америке стали применять быстронасыщающиеся трансформаторы, изменявшие время срабатывания реле. Позднее в схемах защиты от замыканий на землю стали применять магнитные усилители.

Имели место многочисленные попытки применения защиты с электронными лампами, но оказалось, что они не имеют заслуживающих внимания технико-экономических и эксплуатационных преимуществ перед обычными электромеханическими реле. Но безусловно прогрессивным представляется применение в последние годы в устройствах релейной защиты полупроводниковых диодов и триодов. Они позволяют предельно упростить защиты, сделать их более компактными и надежными.

12-2. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

Общей тенденцией в развитии электропередач всегда являлись увеличение передаваемых мощностей, протяженности линий и как следствие увеличение напряжений. По-

вышение этих параметров на каждом новом этапе ставило новые и более сложные задачи перед учеными и инженерами, перед конструкторами электрических машин, трансформаторов, линейных устройств и коммутационной аппаратуры.

Практически возможными являются два метода электропередачи: постоянным или переменным токами. Оба эти метода с различными успехами разрабатывались на протяжении всей истории электроэнергетики. Основными средствами передачи электрической энергии на расстоянии являются воздушные и кабельные линии со всем необходимым оборудованием.

Передача энергии постоянным током

Выше (см. гл. 6 и 8) мы познакомились с историческими путями решения проблемы электропередачи. Мы видели, что борьба за увеличение дальности передачи связывалась с задачей повышения напряжения почти с первых шагов развития техники электропередачи. Наконец, там же было установлено, что раньше всего был испытан метод передачи энергии постоянным током.

В развитии электропередачи постоянным током можно выделить два основных направления: первое направление, характеризующееся попытками получить высокое напряжение без преобразования рода тока, и второе, связанное с использованием преобразовательной техники.

Первые опыты электропередачи на генераторном напряжении были осуществлены еще в 70—80-х годах. Но тогда даже такое небольшое по современным масштабам напряжение, как 6 кВ, оказалось трудно достижимым. Изоляция секций обмоток и коллекторных пластин была явно недостаточной, и из-за пробоев изоляции машины часто выходили из строя. Такое же напряжение удалось получить, соединив последовательно четыре генератора по 1,5 кВ (И. Фонтен). Недостатком этого метода являлось то, что при выходе из строя одной из последовательно соединенных машин прекращалась работа всей установки.

Наибольших достижений в развитии техники передачи электроэнергии постоянным током удалось добиться швейцарскому инженеру Рэне Тюри. Он весьма удачно реализовал предложение Фонтена, введя небольшое усовершенствование: выходявшая из строя машина специальным автоматом отсоединялась от линии, а оба конца линии, подведенные к этой машине, замыкались накоротко. На приемном конце линии сооружалась подстанция, на кото-

рой последовательно включались двигатели. Каждый из этих двигателей приводил в действие генератор низкого напряжения или трансмиссию. Таким образом, «система Тюри» представляла собой линию высокого напряжения, присоединенную своими концами к двум системам последовательно соединенных машин (рис. 12-20).

Первая установка по системе Тюри была осуществлена в Генуе; ее сооружение началось в 1889 г. и закончилось в 1893 г. Эта установка работала сначала при напряжении 5—6, затем 10 и даже 14 кВ при начальной мощности 1260 л. с. Общая длина линий электропередачи достигала 60 км. Затем по системе Тюри было сооружено еще около 15 линий передач (одна из них — в Батуми). Наиболее значительной и долговечной была линия передачи Мутье — Лион во Франции, введенная в эксплуатацию в 1906 г. Эта линия, протяженностью 180 км, первоначально работала при напряжении 57 кВ и была рассчитана на мощность 6300 л. с. На гидростанции в Мутье четыре гидротурбины приводили в действие 16 последовательно соединенных генераторов постоянного тока. В Лионе были сооружены две подстанции с последовательно включенными двигателями. На первой подстанции двигатели приводили в действие генераторы, снабжавшие переменным током осветительную сеть. Генераторы второй подстанции вырабатывали постоянный ток для трамвайной сети. На участке линии, проходившем в районе высокой грозовой активности, были проложены подземные кабели. В 1927 г. электропередача была реконструирована. Последовательно с первой гидростанцией были включены еще две. При этом длина линии возросла на 80 км, а напряжение было увеличено до 125 кВ. Только в 1937 г. линия Мутье — Лион была заменена трехфазной. Остальные линии передачи по системе Тюри были вытеснены линиями трехфазного тока раньше. Ценный опыт эксплуатации воздушного и кабельного участков линии Мутье — Лион при напряжении свыше 100 кВ представляет практический интерес и в наши дни.

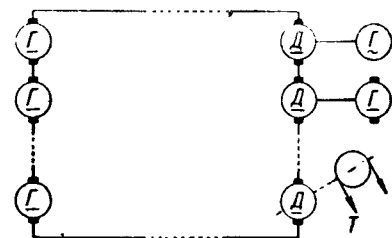


Рис. 12-20. Система Тюри.

Г — генератор постоянного тока; Д — двигатель постоянного тока; Г — генератор переменного тока; Т — трансмиссия.

Опытами передачи по системе Тюри завершилось первое направление в развитии электропередачи постоянным током.

Второе направление возникло в 1918 г. К этому времени, как будет показано ниже, уже успешно действовали мощные электропередачи трехфазным током высокого напряжения (до 150 кВ). Но уже к концу второго десятилетия текущего столетия наметились контуры новой и, нужно сказать, весьма неожиданной проблемы. Дело в том, что при значительных расстояниях передачи при высоком напряжении начинала существенно сказываться емкостная проводимость линии и значительно возрастал емкостный ток¹. При передачах энергии на расстояния более 300—500 км этот емкостный ток уже трудно было бы компенсировать. Первым оценил важность наметившейся проблемы М. О. Доливо-Добровольский, и в ноябре 1918 г., за год до своей смерти, он выступил с докладом на тему «О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния». Эта работа явилась логическим завершением того огромного вклада в развитие электротехники, который был сделан М. О. Доливо-Добровольским.

На основе технико-экономического расчета Доливо-Добровольский показал, что возможности применения переменного тока для целей электропередачи ограничены и будущее в этом вопросе принадлежит постоянному току. В качестве примерной границы применения переменного тока для целей электропередачи он указал напряжение порядка 200 кВ и расстояние порядка нескольких сотен километров. Эти параметры с современной точки зрения являются, конечно, заниженными, но это ни в коей мере не умаляет важности принципиальной постановки задачи.

М. О. Доливо-Добровольский придавал большое значение передаче энергии по кабельным линиям. Постоянный ток в этом отношении был также более благоприятным. При постоянном токе в установившемся режиме либо отпадают вовсе, либо существенно ослабляются недостатки, присущие кабельной линии переменного тока, связанные с индуктивностью, потерями в металлических оболоч-

¹ Здесь речь идет об изолированной работе электрической станции на длинную линию, в конце которой присоединена нагрузка. Емкостный характер тока особенно резко выражен при холостом ходе линии. По мере увеличения нагрузки возрастает компенсирующее действие индуктивности проводов линии.

ках кабеля и очень большими потерями в диэлектрике; надежность и безопасность передачи повышаются, толщина изоляции при том же напряжении может быть уменьшена. В случае постоянного тока становится более эффективной и надежной защита линий и машин; например, для ограничения токов короткого замыкания могут быть установлены реакторы, предельная величина которых определяется только потерями в меди, тогда как при переменном токе существенную роль играет индуктивное падение напряжения в реакторе. Таким образом, Доливо-Добровольский усматривал будущее электропередачи в применении постоянного тока и кабеля.

В 1918 г. Доливо-Добровольский не мог еще оценить недостатков передачи энергии переменным током, связанных с электрической устойчивостью передачи, иначе его рассуждения получили бы еще более аргументированный характер. Замечательным является то, что еще в 1918 г. Доливо-Добровольский указывал, что одной из вероятных схем передачи энергии может быть линия постоянного тока, присоединенная на своих концах к преобразовательным подстанциям. Таким образом, он указал на вероятность того, что генерирование и распределение электроэнергии в будущем будут производиться трехфазным током, а ее передача — выпрямленным током высокого напряжения. В качестве одного из вариантов решения проблемы преобразования трехфазного тока в постоянный Доливо-Добровольский назвал применение ртутных выпрямителей.

Рост мощностей электростанций и дальности электропередач, укрупнение энергосистем были столь быстрыми, что уже в 1920—1922 гг. в США, а затем и в других странах серьезно встал вопрос об устойчивости параллельной работы. Известно, что нарушение устойчивости при каких-либо более или менее резких изменениях режима вызывается расстройством синхронной работы генераторов на связанных линиями электростанциях (в этих случаях линии представляют собой большую индуктивность, разделяющую синхронные генераторы). Глубокое изучение этого вопроса со временем привело к тому, что наряду с другими более или менее успешными методами повышения устойчивости параллельной работы стала рассматриваться и такая радикальная мера, как осуществление межсистемных связей линиями постоянного тока. В этом случае две связанные такой линией системы могут работать и не синхронно друг с другом.

В качестве основной принципиальной схемы стала рассматриваться схема Доливо-Добровольского — линия постоянного тока с преобразовательными подстанциями на концах (рис. 12-21).

При всех своих преимуществах электропередача постоянным током обладает теми крупными недостатками, что она, во-первых, требует применения сложных и дорогих специальных аппаратов: выпрямителей и инверторов и, во-вторых, затрудняет решение задачи об отборе энергии в промежуточных пунктах линии, так как современная техника практически еще не располагает выключателями постоянного тока высокого напряжения. Недостаточная научно-техническая разра-

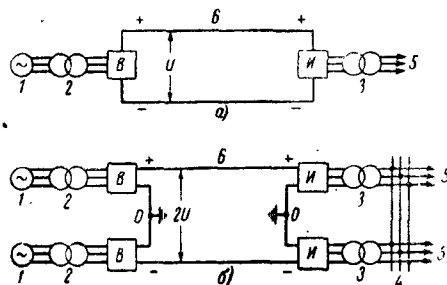


Рис. 12-21. Схемы передачи электроэнергии постоянным током.

а — передача без использования земли; б — передача с использованием земли в качестве нейтрального провода; В — выпрямитель; И — инвертор; 1 — синхронный генератор; 2 — повысительный трансформатор; 3 — понижающий трансформатор; 4 — сборные шины трехфазного тока; 5 — распределительная сеть; 6 — линия передачи.

ботка средств преобразовательной техники, необходимых для установок высокого напряжения и большой мощности, длительное время задерживала внедрение нового типа электропередачи. Особенно активно проблема применения постоянного тока обсуждается в последнее время, когда создание крупнейших энергетических систем, таких, например, как Единая энергетическая система европейской части СССР, потребовало сооружения невиданных по мощности и напряжению магистралей для транспорта электроэнергии. Впрочем, исследования в области повышения устойчивости параллельной работы, выполненные в последние годы, позволяют значительно повысить казавшиеся еще несколько лет назад предельными параметры электропередачи. Опыт эксплуатации линий Волжская ГЭС имени В. И. Ленина — Москва показал, что в настоящее время нет оснований говорить о достижении предела передачи электроэнергии переменным током. Тем не менее указанные выше технические, а также экономические достоинства длинных линий постоянного тока заставляют продолжать энергичные работы по опытной проверке полученных теорией результатов.

В конце 30-х — начале 40-х годов в разных странах было построено несколько опытных линий передачи по-

стоянного тока напряжением 30—90 кв. С 1951 г. в Советском Союзе находится в полупромышленной эксплуатации кабельная линия электропередачи постоянным током Кашира—Москва (112 км), по которой передается мощность 30 тыс. кВт при напряжении 200 кв. С 1954 г. началась опытная, а с 1956 г. — промышленная эксплуатация кабельной линии постоянного тока Швеция — о. Готланд (100 км, 20 тыс. кВт), работающей при напряжении 100 кв (в качестве обратного провода здесь используется морская вода). В ближайшие годы будет сооружена линия постоянного тока 800 кв Сталинградская ГЭС—Донбасс протяженностью 500 км.

Сейчас представляется наиболее перспективным применение кабельных линий постоянного тока даже небольшой сравнительно мощности, в тех случаях, когда линия передачи должна пересекать большие водные пространства (как в случае шведской линии) или проходить через малонаселенные районы, где не требуется осуществлять промежуточных подключений. Возможно также применение мощных линий постоянного тока для связи между собой таких объединенных систем, какими будут, например, единые энергетические системы европейской части СССР и Центральной Сибири.

Передача энергии переменным током

Многолетняя борьба за выбор рода тока закончилась полной победой сторонников переменного тока, причем решающую роль в этой победе сыграл трехфазный ток (см. гл. 8). В настоящее время передача электрической энергии на большие расстояния осуществляется (за теми редкими исключениями, которые указаны несколькими строками выше) только трехфазным переменным током.

Уже отмечалось, что вся история электропередачи сопровождалась увеличением передаваемых мощностей, напряжений и протяженностей линий. На первом этапе преобладающей по важности проблемой было уменьшение потерь в линии передачи, что, следовательно, требовало повышения напряжения электропередач.

К началу 90-х годов прошлого столетия максимальные напряжения достигали 6—10 кв. В Лауфен-франкфуртской передаче уровень напряжений был повышен до 30 кв, а дальность передачи — до 170 км. Передаваемые мощности составляли величину порядка нескольких сотен и — редко — тысяч киловатт. В 1901 г. в Америке на р. Миссиссипи была построена электропередача на 50 кв, затем,

к 1903 г., предельное напряжение возросло до 60 кВ, мощности передач — до 17 тыс. кВт (Ниагара—Буффало), а дальность в одном случае достигла 350 км (Кольгейт—Сан-Франциско). На рис. 12-22 показаны основные этапы роста напряжений.

В течение первого десятилетия текущего столетия на первый план выдвинулась новая проблема — проблема изоляции линий. Применявшиеся штыревые изоляторы не позволяли поднять напряжение выше 60—70 кВ. В связи с этим ограничивалась и пропускная способность линий: для увеличения мощности передачи приходилось соору-

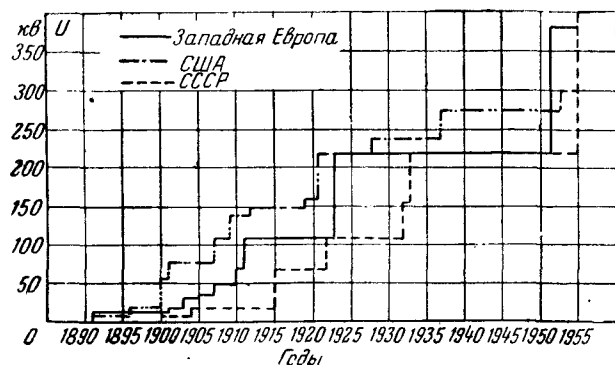


Рис. 12-22. Рост напряжений воздушных линий электропередачи.

жать несколько параллельных цепей, что было весьма дорого. Только изобретение в конце 1906 г. подвесных изоляторов (Хьюлетт, США) позволило резко увеличить применявшиеся напряжения. В 1908—1912 гг. в Америке и Германии были построены первые линии 110 кВ, а следующее десятилетие дало увеличение напряжений еще в 2 раза (1920 г. — 165 кВ и 1922 г. — 220 кВ).

Новое затруднение на пути роста напряжений возникло в связи с увеличением потерь на корону. Многочисленные теоретические исследования, проводившиеся в 1910—1914 гг. (В. Ф. Миткевич в России, Пик в Америке, Г. Камп в Англии и др.), показали, что уменьшить потери на корону (повысить критическое коронное напряжение) можно путем увеличения действительного или «электрического» диаметра провода. Первое направление привело к применению алюминиевых, сталеалюминиевых и полых проводов большого диаметра. Второе направление (предложение

В. Ф. Миткевича, 1910 г.) расширило указанные возможности путем применения расщепленных проводов, когда каждая фаза линии состоит, например, из трех проводов. При этом увеличивается «электрический» диаметр провода и к тому же снижается индуктивность проводов. Последнее обстоятельство оказалось очень важным в дальнейшем развитии техники электропередачи. Известно, что расщепленные провода применены на линии Волжская ГЭС имени В. И. Ленина—Москва.

Когда величины применявшихся напряжений превысили 200 кВ (20—30-е годы), пришлось искать средства для выравнивания распределения напряжения в гирлянде изоляторов. Оказывается, что при столь высоких напряжениях на ближайших к проводу изоляторах напряжение превышает коронное. Корона на изоляторах разрушающим образом действует на ближайшие части линейной арматуры. Устранить указанный недостаток удалось путем применения металлических колец, укрепляемых в нижней и верхней частях гирлянды и выравнивающих электрическое поле.

Следующим этапом борьбы за освоение высоких напряжений явилась разработка методов компенсации индуктивного падения напряжения в линии. При напряжениях свыше 110 кВ и дальности передач свыше 150—200 км индуктивное падение напряжения принимает такие размеры, что становится невозможным поддерживать постоянным напряжение в конце линии. Этот вопрос нашел свое решение путем применения статических конденсаторов и синхронных компенсаторов. Впервые синхронный компенсатор был использован по предложению М. О. Доливо-Добровольского еще в 1892 г. на линии Бюлах—Эрликон (Швейцария).

Наконец, одной из наиболее серьезных проблем современного этапа развития электропередач явилась возникшая в 20-х годах проблема устойчивости параллельной работы электростанций. Известно, что при нарушении статической (при малых нарушениях нормального режима) или динамической (при резких и глубоких нарушениях режима работы) устойчивости генераторы на станциях выпадают из синхронизма и происходит так называемый распад энергетической системы. Если при протяженности линий 200—300 км нет опасений за нарушение статической устойчивости и удается обеспечить динамическую устойчивость при быстром (0,1 сек и меньше) отключении аварийного участка, то при дальности передачи 500—1000 км наиболее сложной задачей является обеспечение статической устой-

чивости. Глубокие работы по анализу этой проблемы выполнили в 30-х годах А. А. Горев, П. С. Жданов, С. А. Лебедев и др. в СССР, Парк, Робертсон и др. в США. В результате широких научных исследований удалось найти ряд методов повышения устойчивости (регулирование турбин, аварийная разгрузка системы по частоте, форсировка возбуждения, внедрение быстродействующих защит, компенсация параметров линии и др.). В настоящее время обеспечена устойчивая работа такой крупнейшей в мире электропередачи, как линия Волжская ГЭС имени Ленина—Москва протяженностью около 900 км с пропускной способностью до 750 тыс. кВт на одну цепь.

Опыт эксплуатации линии Волжская ГЭС имени Ленина—Москва, работающей на напряжении 400 кВ, показал, что эту электропередачу без существенных изменений можно перевести на напряжение 500 кВ. Линия Сталинград—Москва будет работать при напряжении 500 кВ.

Для увеличения пропускной способности ранее построенных линий в настоящее время отказываются по возможности от сооружения новых параллельных цепей, а идут по пути перевода действующих линий на повышенное напряжение. Для этой цели применяются автотрансформаторы (например, 110/154 или 220/330 кВ). В ближайшее время шкала стандартных напряжений в нашей стране пополнится еще напряжением 330 кВ, которое будет применяться для линий умеренно больших протяженности (например, 500 км) и пропускной способности (350—450 тыс. кВт).

На заре развития электроэнергетики многие конструкции и схемы заимствовались из области неэнергетических применений электричества. Особенно много дала в этом отношении телеграфная техника. Выше указывалось (см. гл. 3 и 6), что в связи с развитием телеграфа родилась и получила начальное развитие кабельная техника.

В первые годы строительства силовых электрических сетей наиболее естественной казалась подземная проводка, которая лучше защищена от механических повреждений и не портит внешнего вида улиц. Поэтому уже с 1880 г. делаются первые попытки проложить силовые кабели на напряжение 220 В. Эти кабели ничем в принципе еще не отличались от обычных кабелей связи. В качестве изоляции использовалась гуттаперча. Для сети первой центральной электрической станции (1882 г.) Т. Эдисон создал специальную конструкцию кабеля и кабельной муфты (рис. 12-23).

В 1884 г. в Вене был проложен одножильный силовой кабель с рабочим напряжением 2 кВ, изолированный пропитанным джутом, который уже широко применялся в телеграфных кабелях. Кабели с джутовой изоляцией получили довольно широкое распространение в 80-х и начале 90-х годов прошлого столетия.

Как уже отмечалось (см. гл. 6), решающую роль в развитии кабельной техники сыграло применение пропитанной бумажной изоляции. Вначале (конец 80-х и 90-е гг.) бумажную изоляцию комбинировали с пропитанным джутом, который накладывался поверх бумаги. Однако в первые годы текущего сто-

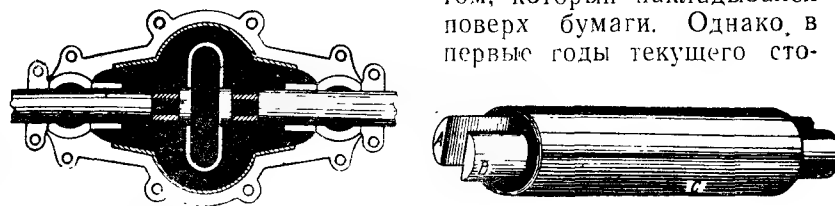


Рис. 12-23. Кабельная муфта и кабель Эдисона (1882 г.). Две металлические жилы полукруглого сечения проложены в железной трубе с заполнением из изолирующей массы.

летия были достаточно выяснены прекрасные изоляционные свойства кабельной бумаги, и она стала основным типом изоляции кабелей.

В 90-х годах стали изготавливать двухжильные концентрические кабели, а несколько позднее, по мере развития техники трехфазного тока, — трехжильные силовые кабели с поясной изоляцией. Для увеличения механической прочности силовые кабели, так же как ранее кабели связи, стали покрывать свинцовыми оболочками.

В 1908—1909 гг. кабели с поясной изоляцией на 20 кВ были проложены в Баку (работают до настоящего времени). В 1910 г. в Германии были использованы трехжильные кабели на напряжение 30 кВ и одножильные на 60 кВ.

Недостатком кабелей с поясной изоляцией является то обстоятельство, что силовые линии электрического поля направлены не только поперек слоев кабельной бумаги, но и вдоль них, где электрическая прочность изоляции значительно ниже. Это оказалось возможным устранить благодаря изобретению в 1913 г. кабеля с экранированными жилами (Хохштедтер, Германия), в котором силовые линии электрического поля имеют только радиальное направление. Такие трехжильные кабели, рассчитанные на напря-

жения до 60 кВ, начали изготавливаться в 1918—1919 гг.

Другим вариантом трехжильного кабеля высокого напряжения явился изобретенный в 1924 г. кабель с отдельно свинцованными жилами (С. М. Брагин и С. А. Яковлев, СССР). В этом кабеле линии электрического поля направлены тоже радиально, но, кроме того, этот кабель



Рис. 12-24. Участок улицы с воздушной распределительной сетью и после замены этой сети кабельной (справа).

более гибок и надежен в эксплуатации. Такой кабель на напряжение 33 кВ был проложен в 1924—1926 гг. в Ленинграде (ленинградское кабельное кольцо).

Борьба за повышение напряжений на кабельных линиях привела к созданию маслонаполненных кабелей, изобретенных в 1919 г. и начавших изготавливаться в 1923 г. Позднее, в 1926—1928 гг., стали появляться газонаполненные кабели, а затем, на 30-х годах, маслостатические кабели (три экранированные жилы находятся в стальной трубе, которая заполняется маслом под давлением до

15 ат). Маслостатические кабели, изготовленные на напряжении 110—220 кВ, оказываются значительно дешевле маслонаполненных на такое же напряжение, так как не нуждаются в свинцовых покрытиях.

Для некоторых типов кабелей высокого напряжения (переносные, рентгеновские и др.) применяется резиновая изоляция.

По мере развития разветвленных электрических распределительных сетей, когда стоимость кабельных линий стала весьма ощутимой, все чаще стали строить более дешевые воздушные линии.

Воздушные линии получили исключительное применение для дальних линий электропередачи. Но в начале текущего столетия в распределительных сетях пришлось вновь возвращаться к кабельным линиям, так как к этому времени над улицами городов повисла опасная для людей и портящая внешний вид паутина проводов. Городские власти стали добиваться замены существовавших воздушных линий кабельными и запрещали строительство новых воздушных распределительных сетей. На рис. 12-24 показан один и тот же участок улицы до и после замены воздушной сети кабельной.

В настоящее время кабели умеренно высоких напряжений применяются для распределительных сетей, а кабели любых напряжений прокладываются для осуществления глубокого ввода в город линий электропередачи или в некоторых других специальных случаях.

Воздушные линии Как только что было отмечено, для электропередач большой протяженности преимущественное применение получили воздушные линии. Исторически сложилась основная схема передачи и распределения электроэнергии: от районной электростанции идут одна или несколько цепей линии электропередачи, затем от приемной подстанции — питающие провода или фидеры, идея которых была выдвинута еще около 1880 г. Т. Эдисоном; наконец, от трансформаторных пунктов снабжается энергией разветвленная местная сеть. Со временем появились различные модификации основной схемы электроснабжения: замыкание линий в кольцо, перенесение подстанций внутрь цехов промышленных предприятий и т. п.

Особенно удачным оказалось сооружение колец линий высокого напряжения вокруг крупных промышленных городов. Эти кольца играют роль сборных шин, на которые

по радиальным линиям вливается энергия от районных электростанций. Такое кольцо воздушных линий, в частности, создано вокруг Москвы, по примеру которого строились кольца в некоторых зарубежных городах.

Большое развитие также получило применение ввода линий высокого напряжения в центры промышленных городов («глубокий ввод»). Это дает значительное снижение потерь в электрической сети крупного города. Одним из первых в мировой практике явился глубокий ввод линии Шагура — Москва (1925 г.), которая вошла в самый центр города, к Кремлю.

Известно, что основными элементами воздушных линий являются провода, изоляторы и опоры. Эта так называемая механическая часть линий передачи вначале целиком была заимствована у телеграфных линий. Опоры выполнялись в виде деревянных столбов, провода были сначала стальными, а изоляторы — штыревыми (стеклянными, а затем фарфоровыми).

Постепенно в 80-х и 90-х годах прошлого столетия стальные провода стали вытесняться медными. Начавшееся в конце прошлого века промышленное производство электролитической меди позволило снизить в несколько раз ее стоимость, хотя и до сегодняшнего дня медь остается дефицитным и сравнительно дорогостоящим материалом. В течение первых десятилетий текущего столетия медь заняла место основного проводникового материала в электротехнике.

Новый этап в развитии механической части линии был связан с переходом к алюминиевым и сталеалюминиевым проводам (в последнем случае центральная стальная жила придает проводу необходимую механическую прочность). Применение алюминиевых проводов началось с 1897 г., когда были найдены новые, более дешевые способы производства алюминия. В СССР алюминиевые и сталеалюминиевые провода стали внедряться с 1927 г.

С ростом напряжений изменялись конструкции изоляторов. Уже на рубеже 80-х и 90-х годов XIX в. применение простых штыревых колоколообразных изоляторов оказалось недостаточным. Для усиления изоляции на штыревых изоляторах стали делать кольцеобразный желоб, заполнявшийся маслом. Так возникли фарфорово-масляные изоляторы (рис. 8-18). В 1898 г. в Германии получил распространение изолятор с длинными и тонкими фарфоровыми юбками, названный штыревым изолятором типа «дельта».

Этот изолятор применялся для напряжений до 70 кВ. Позднее, на основе теоретических исследований, был разработан изолятор типа «фарадoid», поверхность которого очерчивалась по силовым линиям электрического поля.

Как отмечалось, повысить напряжение электропередач выше 60—70 кВ удалось после изобретения в 1906 г. под-

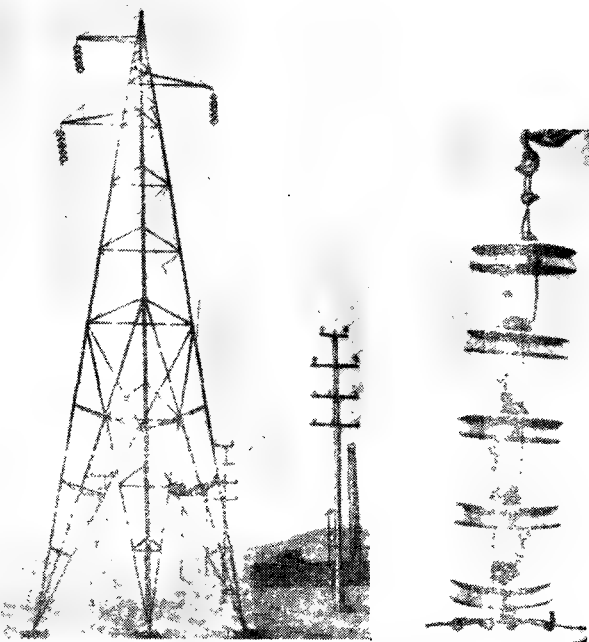


Рис. 12-25. Линия 110 кВ с первыми подвесными изоляторами 1908 г.

весных изоляторов, получивших повсеместное распространение для напряжений выше 35 кВ. На рис. 12-25 показана одна из первых линий 110 кВ с подвесными изоляторами.

Большое многообразие конструкций характерно для развития опор линий передач. До начала текущего столетия строились исключительно деревянные опоры с горизонтальными траверсами. На ранних этапах развития техники электропередачи существовало преувеличенное опасение асимметрии в расположении проводов трехфазных линий.

Поэтому провода обычно располагались в вершинах равно-
стороннего треугольника. С 1904 г. линии стали сооружать
на металлических опорах, что позволило увеличить про-
лет с 30—40 до 135 и более метров. В 1906 г. выделились
два основных типа опор: промежуточные, рассчитанные
лишь на боковое давление ветра, и анкерные, способные
противостоять продольным усилиям, возникающим в ли-
нии. Металлические опоры применялись преимущественно
для линий, работающих при напряжении 110 кВ и выше.
Однако долгое время инженеры не решались сделать вы-
бор между металлическими и деревянными опорами. На
рис. 12-26 показаны две цепи линии, идущей в Сан-Фран-
циско (20-е годы текущего столетия), одна из которых
выполнена на деревянных опорах, а другая — на металли-
ческих. В 20-х и 30-х годах XX в. все более и более утвер-
ждается мысль о том, что в странах, богатых лесами, целе-
сообразно сооружать деревянные опоры и для линий высо-
ких напряжений. Такие условия весьма характерны, напри-
мер, для таких стран, как СССР и США.

В Советском Союзе с первых лет электрификации очень
широко применяются деревянные опоры. Здесь были вы-
полнены (Н. И. Сушкин и А. А. Глазунов) всесторонние
исследования механической прочности и разработаны весь-
ма удачные конструкции деревянных опор. Основным ти-
пом опоры линий 110 и 35 кВ стала деревянная П-образная
опора. В СССР, так же как и в США, имели место попыт-
ки применять деревянные опоры даже для линий 220 кВ
(Рыбинск — Углич, Магнитогорск — Златоуст). Все же для
линий 220 кВ и выше обычным стало применение металли-
ческих опор. На рис. 12-27 показана опора линии 287 кВ
Боулдер-Дэм — Лос-Анжелос, а на рис. 12-28 — опора ли-
нии 400 кВ Волжская ГЭС имени В. И. Ленина — Москва.

Прогрессивным направлением в развитии конструкций
опор является изготовление опор из железобетона.

В заключение данного раздела следует упомянуть
о применении грозозащитных тросов. Стальные заземле-
ные тросы, натянутые над проводами линии передачи,
стали применять еще в начале 90-х годов. Назначением
этих тросов считалась защита линий от ударов молний.
Однако после того как в 1913 г. была разработана теория
защиты при помощи тросов от индуцированных перена-
пряжений (Петерсен), распространилось мнение о том, что
трос не защищает от прямых ударов молний, а на дере-
вянных опорах применение троса стали даже считать вред-

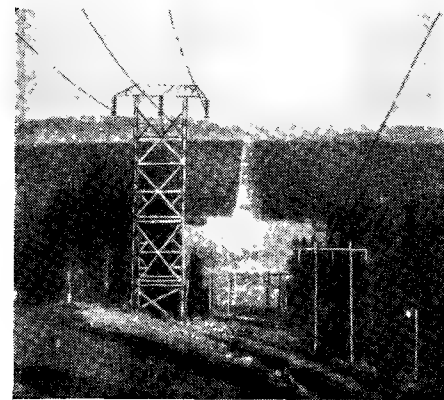


Рис. 12-26. Две цепи линии 220 кВ, иду-
щей в Сан-Франциско, одна из которых
выполнена на деревянных опорах, дру-
гая — на металлических.

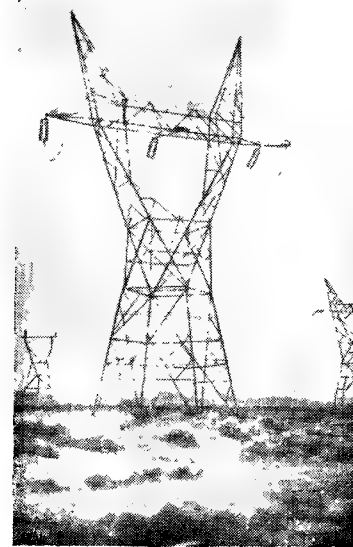


Рис. 12-27. Опора линии 287 кВ
с пропускной способностью свы-
ше 200 тыс. кВт (Боулдер-Дэм—
Лос-Анжелос).

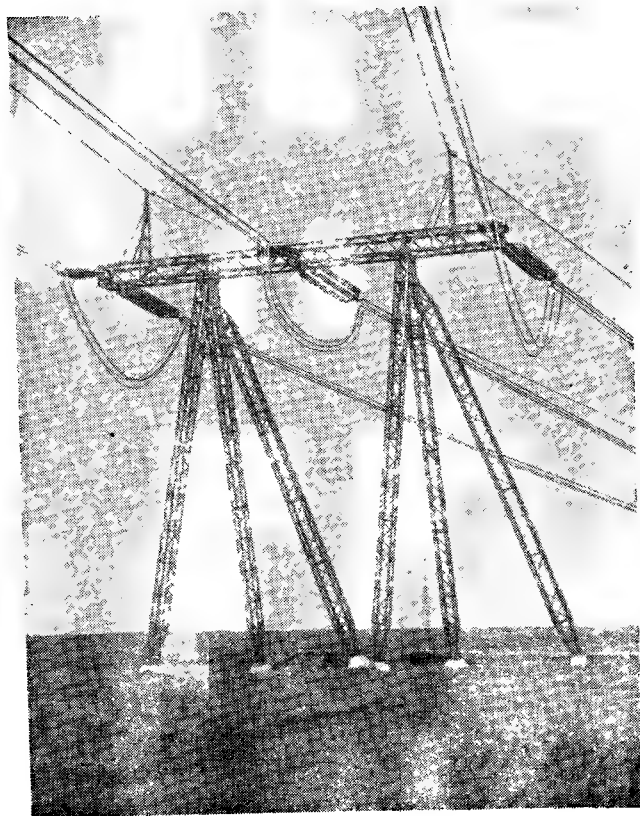


Рис. 12-28. Опора линии 400 кВ пропускной способностью около 750 тыс. кВт (Куйбышев — Москва).

ным. Понадобились глубокие исследования, выполненные в полевых лабораториях в 20-х и 30-х годах, чтобы вновь весьма убедительно было обосновано защитное действие троса.

12-3. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Возникновение электрических систем До появления районных электрических систем электрических систем практически не было. Электростанции работали изолированно, каждая имела свою нагрузку. Этому обстоятельству электроэнергетика начала XX в. была обязана теми неисчислимыми трудностями, которые вытекали из много-

образия параметров отдельно работавших станций. Действительно, при изолированной работе станций не было большой необходимости устанавливать стандартные частоты и напряжения, и последние принимались в зависимости от конкретных условий данной станции. Последствия этого еще и теперь сказываются в некоторых странах: например, в США и Японии приходится подключать на параллельную работу электростанции, работающие при различных частотах (50 и 60 гц). Тем не менее потребность объединять работу нескольких электростанций на общую сеть стала проявляться уже в 90-х годах прошлого столетия. Было выяснено, что при совместной работе электростанций уменьшается необходимый резерв на каждой станции в отдельности, появляется возможность ремонта оборудования станции без отключения основных потребителей, создаются условия для выравнивания графика нагрузки так называемых базисных станций, для более эффективного использования энергетических ресурсов.

Включение на параллельную работу электростанций постоянного тока не вызвало особых затруднений, если эти станции имели одинаковые напряжения и были расположены недалеко одна от другой. Но нередко нужно было объединять работу станций, расположенных в районах, удаленных друг от друга. Низкое напряжение, принятое на станциях постоянного тока, не позволяло осуществить непосредственное соединение этих станций линиями постоянного тока. В таком случае приходилось прибегать к преобразованию постоянного тока в переменный ток высокого напряжения. На электростанциях устанавливались двигатель-генераторные преобразователи, и станции связывались между собой линиями переменного тока.

Первое известное объединение двух электростанций трехфазного тока было осуществлено в 1892 г. в Швейцарии. Две небольшие электростанции — в Глэдфельдене (120 кВа) и Гохфельдене (360 кВа) — были соединены 2-километровой линией 5 кВ и питали распределительную сеть завода фирмы Эрликон по линии передачи протяженностью 24 км при напряжении 13 кВ. Возбуждение генераторов первой станции регулировалось со щита управления второй.

Однако в первое десятилетие после этого опыта процесс объединения электрических станций еще не получил заметного развития. Только с возникновением крупных районных электростанций, особенно после 1900 г., этот процесс

стал определяющим для прогресса электроэнергетики. Так, к 1905 г. в США уже работали три крупные для того времени энергетические системы: Южно-Калифорнийская, в районе Сан-Франциско и в штате Юта. Первая из этих систем (компания Эдисона) объединяла четыре гидравлические станции и четыре тепловые с общей установленной мощностью около 12 тыс. квт. Сеть этой системы напряжением 2—30 кв имела общую протяженность 960 км и охватывала 18 городов. В системе применялись синхронные компенсаторы.

В России до Великой Октябрьской социалистической революции действовали две небольшие системы. Одна из

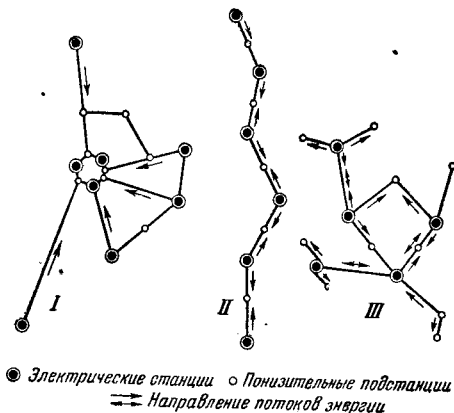


Рис. 12-29. Основные типы сетей энергетических систем.

Энергетические системы создавались в крупных промышленных и густонаселенных районах. Естественно, географическое положение этих районов накладывало свой отпечаток на формирование энергетических систем. Постепенно выявилось три основных типа сетей энергосистем (рис. 12-29). Первый тип представляет собой системы с центральным узлом, который питается по радиальным линиям от районных электростанций (рис. 12-29, I). Примером такой схемы может служить энергосистема Московской обл. Второй тип систем характеризуется большой протяженностью линий передачи, связывающих цепь электростанций (рис. 12-29, II). По такому пути развивалась, например, Уральская энергосистема. И, наконец, третий тип энергосистем может характеризовать энергосистема Донбасса, представляющая собой разветвленную сетку линий с электростанциями в узлах (рис. 12-29, III).

При параллельной работе нескольких электростанций возникали новые и весьма важные задачи. Нужно было обеспечить экономичное распределение нагрузки между станциями, не допускать нарушений устойчивой работы, регулировать напряжение в сети. Без решения этих задач параллельная работа станций существенно затруднялась. Каждая станция стремилась работать в наиболее выгодном для себя режиме: не принимать слишком большой нагрузки в часы максимума и не снижать своей мощности в часы минимума нагрузки. Стало неизбежным подчинить работу всех станций системы одному ответственному инженеру. Так возникла идея диспетчерского управления.

В СССР впервые функции диспетчера стал выполнять с 1923 г. дежурный инженер 1-й Московской станции, а в 1925 г. в системе Мосэнерго был организован диспетчерский пункт. Вслед за Мосэнерго диспетчерские пункты стали возникать в других системах СССР. При диспетчерских пунктах организовывались специальные службы систем: служба релейной защиты, служба изоляции и грозозащиты и др.

Возникновение
объединенных
энергосистем

Следующим этапом в развитии энергетических систем явилось объединение отдельных систем в более крупные объединенные энергосистемы путем сооружения мощных межсистемных линий электропередачи. Такие крупные системы позволяют наилучшим образом использовать установленную на электростанциях мощность, оборудовать станции предельно круп-

них находилась на юге, где довольно разветвленная кабельная сеть 20 кв питалась от двух бакинских электростанций, мощность которых к 1914 г. достигла 36,5 и 11 тыс. квт. Другая — упоминавшаяся выше московская система, включавшая в себя две станции: Московскую городскую (ныне 1-я МГЭС) и станцию «Электропередача» (ныне ГРЭС имени Классона). На западе в то время уже создавались более крупные системы. В Германии была образована Рейнская система, которая впоследствии превратилась в Рейнско-вестфальскую энергетическую систему, одну из наиболее крупных в мире. Энергосистема четырех южных штатов США (Джорджия, Северная Каролина, Южная Каролина и Теннесси) к 1914 г. уже объединила электростанции суммарной мощностью 230 тыс. квт и простиралась с востока на запад на 1500 км.

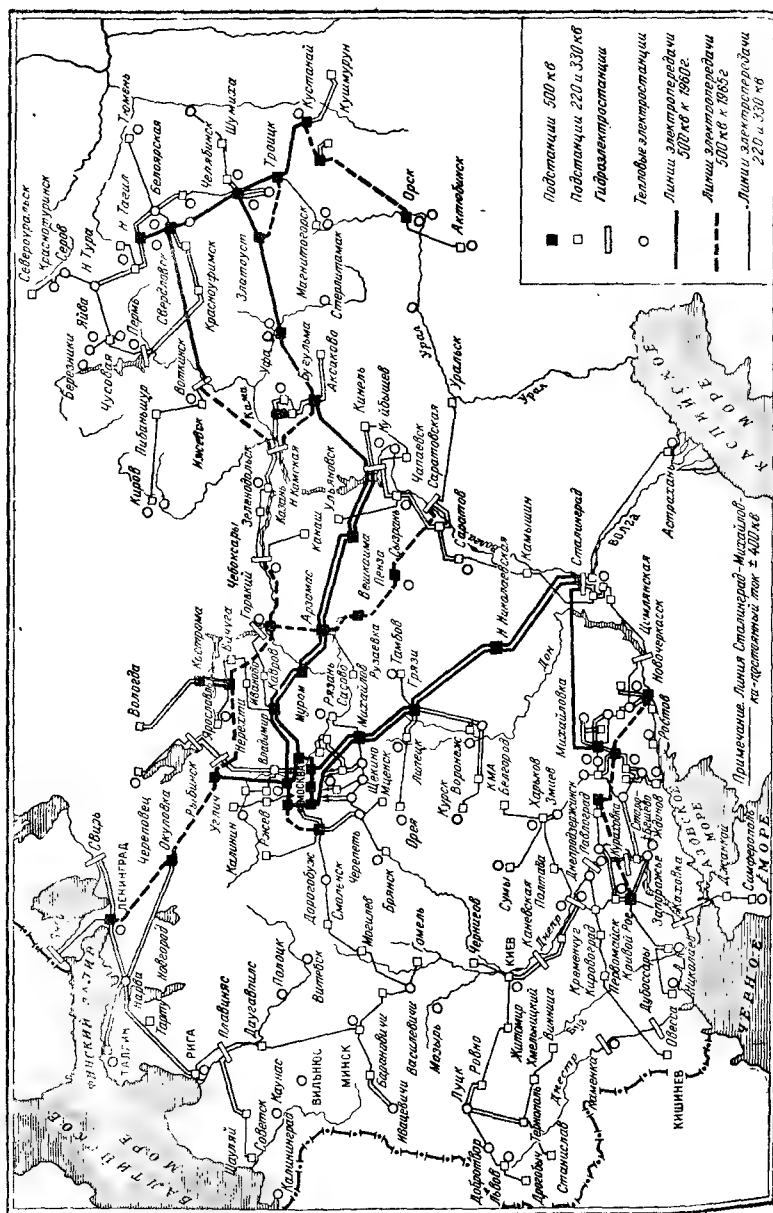


Рис. 12-30. Вариант Единой энергетической системы европейской части СССР.

ными агрегатами (200—600 Мвт в единице) при относительно малом резерве и широко использовать сезонные колебания мощности гидроэлектростанций. При значительных протяженностях систем в меридиональном и широтном направлениях становится возможным получение более равномерного графика нагрузки вследствие временных (например, по поясам времени) смещений пиков нагрузки. Так, в 30-х годах в СССР проходило объединение энергосистем Московской, Горьковской, Ивановской, Ярославской и других областей. Благодаря этим мероприятиям объединенная система Центра по суммарной мощности и выработке электроэнергии выдвинулась на первое место в Европе.

Высшей на современном этапе формой создания энергетических систем является образование единых энергетических систем крупных географических областей. Существуют единые энергетические системы в странах Западной Европы; в США работает энергосистема, объединяющая несколько десятков миллионов киловатт установленной мощности.

В настоящее время создается Единая энергетическая система европейской части СССР, которая со временем объединит работу электростанций с суммарной мощностью около 50 млн. квт. Магистральные линии этой системы будут работать при напряжении 500 кв и иметь протяженность до 1000 км. На рис. 12-30 показан вариант этой Единой энергетической системы.

Если на первом этапе создания Единой энергетической системы европейской части СССР основными звеньями системы будут крупные тепловые (1 млн. квт и выше) и гидравлические электростанции, то по мере включения в сферу этой системы районов, менее богатых энергетическими ресурсами, повысится роль и значение крупных атомных электростанций.

Известно, что, помимо указанной системы, будет создана Единая энергетическая система Центральной Сибири с перспективой объединения ее с системой европейской части СССР.

Развитие системной автоматики

Управление современными энергетическими системами невозможно без автоматически действующих устройств. На ранних этапах развития электроэнергетики основные усилия в области автоматизации электростанций и электрических сетей были сосредоточены на совершенствовании релейной защиты. В процессе дальнейшего развития элек-

трических станций и сетей, особенно в связи с созданием энергетических систем, возникла задача автоматизации и телемеханизации электрических систем.

Первые крупные работы по автоматизации и телемеханизации электростанций были выполнены в 20-х годах текущего столетия. Известно, что в силу специфических условий технологического процесса и, в частности, благодаря возможности в предельно короткий срок (3—5 мин) пустить в ход и поставить под полную нагрузку гидроагрегат гидростанции более просто поддаются автоматизации, чем тепловые станции. Это обстоятельство и определило первенствующую роль гидростанций в развитии автоматизации и телемеханизации. На рис. 12-31 показана одна из первых американских полностью автоматизированных гидростанций (1923 г.).

В СССР первые автоматизированные гидростанции появились перед Великой Отечественной войной (Ереванская ГЭС, Ивановская ГЭС); некоторые гидростанции были автоматизированы во время войны, а к 1949 г. на телеуправление был переведен целый каскад гидростанций Узбекэнерго. В настоящее время автоматизированы практически все гидростанции, а некоторые из них переведены на работу без дежурного персонала.

Очень большое значение с точки зрения повышения безаварийности работы (автоматика действует быстрее и безошибочнее, чем персонал) и снижения численности обслуживающего персонала имеют телемеханизация и автоматизация подстанций и сетевых районов. Первая подстанция в СССР была телемеханизирована в 1950 г.



Рис. 12-31. Одна из первых полностью автоматизированных гидростанций (США, 1923 г.).
Справа — панель управления ГЭС.

(Южная подстанция в Узбекэнерго), а в 1954 г. были телемеханизированы уже 184 подстанции. В 1956 г. были телемеханизированы 10 сетевых районов.

Опыт эксплуатации энергетических систем показал, что в 70—80% всех случаев коротких замыканий (из-за перекрытия изоляции) электрическая дуга гаснет и можно вновь включить отключившуюся цепь без каких-либо ремонтных работ. В связи с этим в 30-х годах были разработаны и началось внедрение устройств автоматического повторного включения (АПВ) как трехфазных, так и пофазных. Выше уже упоминалось об автоматических устройствах для регулирования напряжения генераторов с форсировкой возбуждения, которые стали применяться в качестве одного из средств повышения статической устойчивости. В 40-х годах в энергосистемах СССР начали внедряться методы компаундирования синхронных генераторов, разработанные в 1941—1943 гг. Институтом электротехники АН УССР. Схемы компаундирования со статическими выпрямителями были предложены еще М. О. Доливо-Добровольским в 1902 г., но тогда они не получили практического применения из-за несовершенства вентильных устройств, а также в связи с тем, что в то время эта проблема не стояла еще так остро, как сейчас.

Следующим мероприятием, повысившим надежность электроснабжения, явилось внедрение автоматической аварийной разгрузки по частоте (ААРЧ). Устройства ААРЧ, внедряющиеся в электроэнергетику в последние два десятилетия, служат для того, чтобы при аварийном отключении генераторов сохранить электроснабжение ответственных потребителей; это достигается отключением части потребителей с тем, чтобы не допустить перегрузки оставшихся в работе машин и, следовательно, не допустить снижения частоты в системе.

В последние десятилетия электрические системы оборудуются также устройствами автоматического ввода резервных трансформаторов и линий (АВР), а в самое последнее время разрабатываются устройства для регулирования частоты и распределения нагрузки между генераторами в пределах одной станции (Днепрогэс, 1952 г.) и между станциями в системе.

Таковы те достижения в развитии энергетических систем, с которыми энергетическая техника вступила во вторую половину XX в.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

РАЗВИТИЕ ОСНОВНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

13-1. РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

Из всего многообразия электрических устройств и элементов, которые входят в понятие «электротехническое оборудование», здесь будут рассмотрены только основные: электрические машины, трансформаторы и выключатели.

В развитии электрических машин в первой половине текущего столетия можно отметить несколько характерных тенденций:

1. Все большее *расширение области применения машин* и в связи с этим *разнообразие их конструкций* и *широкий диапазон мощностей*. В современном электромашиностроении мощности машин составляют от долей ватта (микромашины) до сотен тысяч киловатт (турбогенераторы); длина и диаметр машин возможны от нескольких сантиметров до нескольких метров, скорости вращения ротора машин бывают и несколько оборотов в минуту и десятки тысяч. За последние годы особенно развилось производство специализированных электрических машин.

2. Значительное *снижение удельного расхода активных материалов*, уменьшение габаритов и веса машин на единицу мощности при сохранении, а в ряде случаев и повышении их к. п. д. и способности к перегрузке.

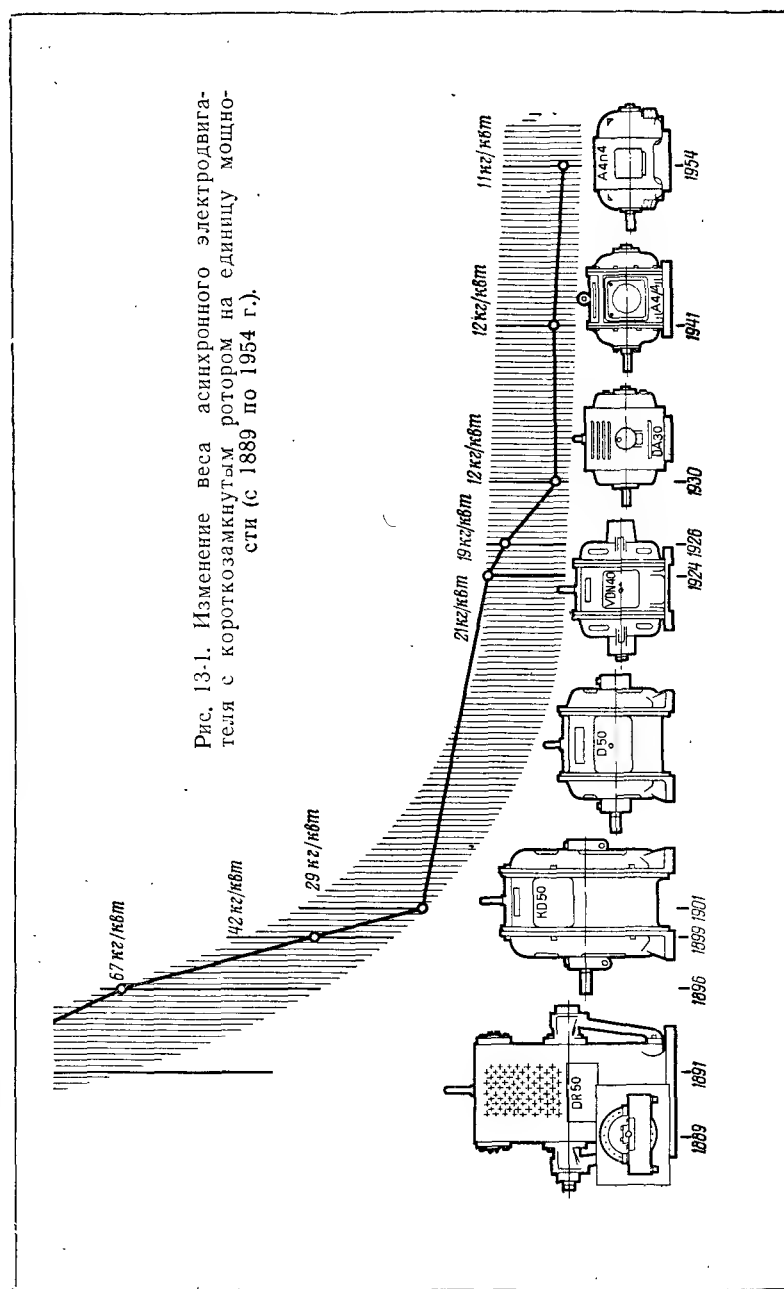
Указанная тенденция наглядно иллюстрируется приведенной таблицей, а также кривой (рис. 13-1).

Показатели	Род машины					
	Генератор		Двигатель		Трансформатор	
Год выпуска	1900	1920	1900	1920	1900	1920
Мощность	3000 ква	3 000 ква	148 квт	148 квт	1 200 ква	1 200 ква
Скорость вращения, об/мин	83	83	187	187	—	—
Вес, кг	127 000	71 000	10 020	4 180	13 600*	5 250*
Вес, %	100	56	100	41	100	38,5%
						41,5

* Над чертой вес без масла, под чертой—с маслом.

Увеличение скоростей вращения и мощностей машин при уменьшении их габаритов привело не только к росту механических напряжений в материалах, но и к значительному повышению электромагнитных нагрузок. Так, например, в современных машинах плотность тока в проводниках обмотки и количество ампер-проводников на единицу длины полюсного шага вдвое превышают эти же показатели в машинах первых двух десятилетий нашего века.

Резкое снижение габаритов и веса машин, а также улучшение их технико-экономических показателей были обусловлены успехами в области теории и расчета электрических машин, совершенствованием технологии их изго-



товления и внедрением новых, более прочных и более высококачественных магнитных и изоляционных материалов. Существенное значение при этом имели уменьшение добавочных потерь в машине и разработка более эффективных методов охлаждения и схем вентиляции.

3. *Повышение надежности эксплуатации и долговечности* машин, достигнутое в основном в результате улучшения качества витковой и корпусной изоляции и совершенствования технологии ее изготовления. Повышенные теплоустойчивость, влажностойкость, механическая прочность изоляции были осуществлены за счет перехода на непрерывную компаундированную изоляцию крупных машин высокого напряжения (вместо гильзовой), покрытия витков бумажной или слюдяной лентой, внедрения стекляных лент, стеклолакотканей, синтетических пленок. Особая роль в повышении надежности машин, а также уменьшении их габаритов принадлежит кремний-органической изоляции.

4. *Внедрение новых магнитных материалов* с высокой магнитной проницаемостью и малыми удельными потерями (в частности, холоднокатаная сталь, специальные сплавы), а также внедрение более легких проводниковых материалов без ухудшения их электропроводности (проводниковый алюминий и др.); расширение ассортимента материалов: немагнитная ковкая и литая сталь, немагнитный чугун, хромо-никель-молибденовая сталь.

5. *Значительное усовершенствование многих технологических процессов* в области электромашиностроения и введение новых производственных приемов, таких, например, как горячая штамповка, электросварка.

Для иллюстрации характерных тенденций в развитии электрических машин в текущем столетии рассмотрим отдельно развитие трехфазных синхронных генераторов, асинхронных двигателей и трансформаторов.

Развитие синхронных генераторов. Трехфазные синхронные¹ генераторы с приводом от паровой или гидравлической турбины используются в качестве основных источников переменного тока², устанавливаемых на электрических станциях.

¹ Термин «синхронная машина» введен Ч. П. Штейнметцем.

² Следует отметить, что в первые годы создания турбогенераторов наряду с машинами переменного тока строились и турбогенераторы постоянного тока, предельная мощность которых достигала 2 000 квт при 1 500 об/мин. Однако сложность коммутации, а также меньшая надежность турбогенераторов постоянного тока привели (в особенности после внедрения переменного тока в промышленность) к их постепенной замене турбогенераторами переменного тока.

Современные типы конструкций роторов синхронных генераторов с явно выраженными полюсами (в тихоходных машинах, рис. 13-2) и в виде цилиндрического ротора с неявно выраженными полюсами (в быстроходных машинах, рис. 13-3) были разработаны в конце XIX в.

Первые синхронные генераторы работали с малым числом оборотов; они приводились в движение от паровых машин или двигателей внутреннего сгорания посредством ременной передачи. При этом оказывалось возможным подобрать для генератора наиболее благоприятную скорость вращения. Для нормальных машин с ременной пере-

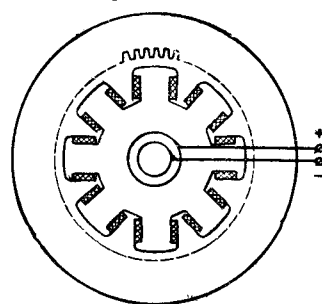


Рис. 13-2. Явнополюсная синхронная машина.

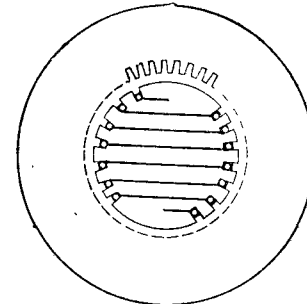


Рис. 13-3. Неявнополюсная синхронная машина.

дачей окружная скорость ротора находилась в пределах 15—25 м/сек. Однако с ростом мощности генераторов неудобства, связанные с наличием ременной передачи, привели к тому, что с начала 90-х годов прошлого века генераторы стали непосредственно соединять с вращающими их первичными двигателями. Это накладывало определенные ограничения на конструкции генераторов, так как скорость вращения определялась первичным двигателем.

Первичными двигателями генераторов сначала служили паровые машины, которые строились до мощности 4 000 квт при скоростях вращения до 260 об/мин. Для уменьшения неравномерности хода необходимо было, увеличить инерцию вращающихся частей. В связи с этим были разработаны генераторы так называемого маховикового типа. Вращающиеся индукторы этих генераторов играли одновременно роль маховиков для первичного двигателя. На рис. 13-4 изображен типичный для конца XIX в. генератор Всеобщей компании электричества на 600 квт при 107 об/мин. Тихоходные синхронные генераторы приводи-

лись также и от двигателей внутреннего сгорания. Наибольший из построенных синхронных генераторов, непосредственно соединявшихся с двигателем внутреннего сгорания, имел мощность 13 000 ква, 94 об/мин и был установлен на Гамбургской электростанции. Тихоходные генераторы имели якорь очень большого диаметра при незначительной длине. Малая скорость вращения генераторов, приводившихся в движение поршневыми двигателями,

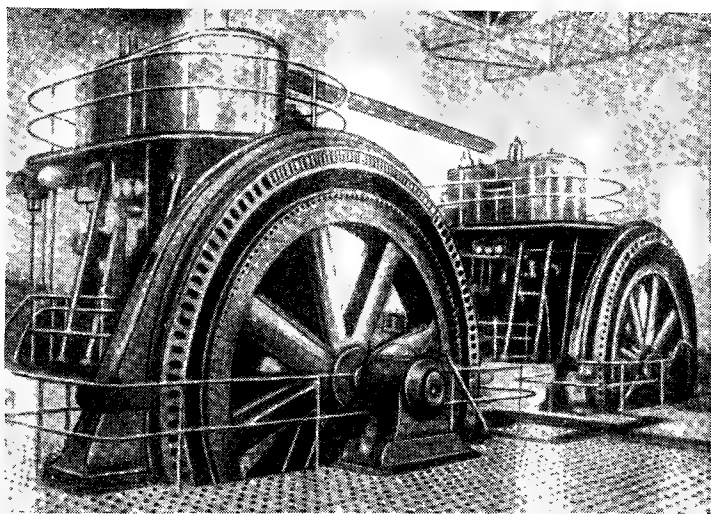
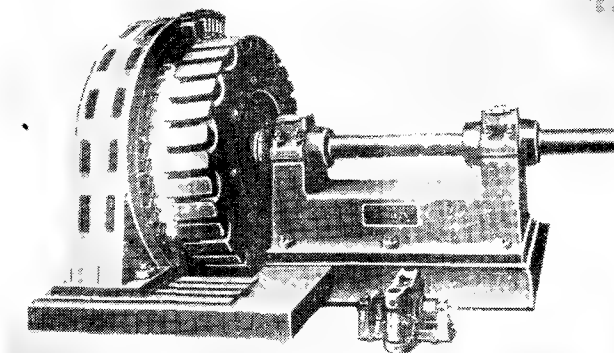


Рис. 13-4. Генератор Всеобщей компании электричества.

вызывала необходимость строить генераторы с большим числом полюсов, что увеличивало расход активных материалов и потери в машине.

Одним из первых синхронных трехфазных генераторов, получивших практическое применение, был генератор, построенный швейцарской фирмой «Эрликон» по проекту Ч. Броуна (230 ква, 95 в, 150 об/мин, $f=40$ гц, $2p=16$) для Лауфен-Франкфуртской электропередачи 1891 г. Общий вид генератора изображен на рис. 13-5. Привод его осуществлялся от гидротурбины. Внешний диаметр статора составлял почти 2 м (1,89 м) при длине машины 0,4 м. Стремление осуществить обмотку возбуждения, общую для всех полюсов, привело к разработке специального гребенчатого (клювообразного) ротора (рис. 13-5).

Обмотка возбуждения размещалась между двумя стальными щеками с когтеобразными выступами. Применяя всего одну катушку возбуждения, конструктор предполагал снизить мощность возбуждения и расход меди, однако он не учел, что большое магнитное рассеяние клювообразных полюсов при сравнительно малом магнитном потоке приведет к резкому колебанию напряжения при изменении нагрузки (что в действительности и имело место). Кроме того, общая вращающаяся обмотка возбуждения испыты-



• Рис. 13-5. Синхронный генератор фирмы «Эрликон» (1891 г.). Индуктор генератора выдвинут вправо.

вает значительные усилия от центробежных сил, вызывающих разрушение изоляции. Подобный тип роторов сохранился в машинах небольшой мощности специального назначения.

Вполне закономерным явлением в электромашиностроении 90-х годов прошлого века являлась разработка разнообразных конструкций *индукторных* машин. Основным достоинством индукторных генераторов являлась возможность получения стандартной частоты при низких скоростях вращения, так как частота тока зависела от выбора числа зубцов индуктора. Конструкция индукторных машин (рис. 13-6) отличалась простотой и надежностью: катушки возбуждения и обмотка якоря размещались в неподвижном ярме; вращающийся индуктор с определенным числом зубцов вызывал изменение проводимости магнитной цепи, и в обмотке наводилась э. д. с. Индукторные генераторы

имели большой диаметр и незначительную длину; в ряде конструкций выступы индуктора укреплялись непосредственно на маховике паровой машины.

С появлением паровых турбин, имеющих значительные числа оборотов, возник новый тип быстроходного синхронного генератора — турбогенератор¹.

Первоначально роторы турбогенераторов имели явно выраженные полюсы, но при больших скоростях значитель-

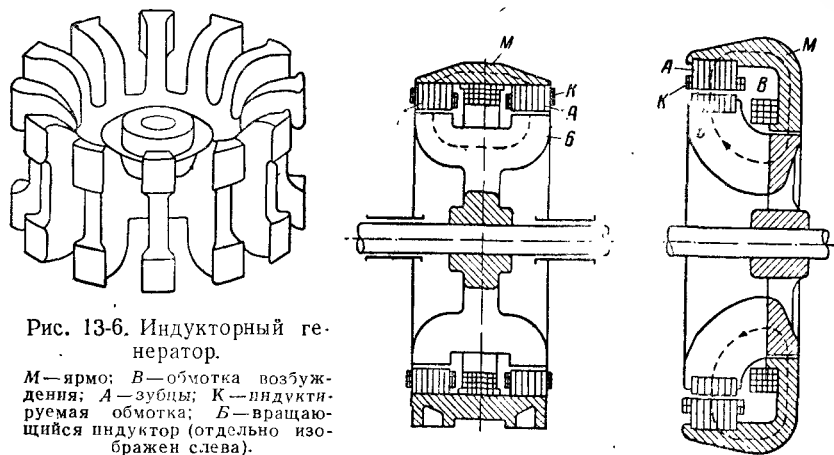


Рис. 13-6. Индукторный генератор.

М — ядро; В — обмотка возбуждения; А — зубцы; К — индуктируемая обмотка; Б — вращающийся индуктор (отдельно изображен слева).

но возрастала механическая нагрузка на части ротора, а также увеличивались потери на трение о воздух. Поэтому роторы турбогенераторов стали изготавливаться с распределенной обмоткой возбуждения.

Увеличение быстроходности и рост мощностей генераторов были непосредственно связаны с частотой переменного тока, получаемого от этих машин. Вначале не существовало общепринятой стандартной частоты, и только к концу XIX в. в Европе стала общепринятой частота 50 гц, а в США — 60 гц. Турбогенераторы в странах Европы строились с одной, двумя и тремя парами полюсов и со скоростями вращения соответственно 3 000, 1 500 и 1 000 об/мин; в США при тех же значениях числа пар полюсов (но при $f=60$ гц) скорость вращения составляла 3 600, 1 800 и 1 200 об/мин.

Успехи в области турбогенераторостроения в первой четверти текущего столетия характеризуются значительным ростом единичных мощностей турбогенераторов, увеличением скорости вращения (до 3 000 об/мин) и повышением их технико-экономических показателей. Увеличение единичной мощности турбогенераторов объясняется значительными преимуществами машин большой мощности: уменьшение веса на 1 квт, уменьшение необходимой площади для установки агрегата, сокращение обслуживающего персонала. Так, например, если в 1904—1906 гг. максимальная мощность турбогенераторов находилась в пределах 1 250 квт (при 3 000 об/мин) и 6 300 квт (при 1 000 об/мин), то в 1913 г. она возросла (соответственно) до 6 250—29 500 квт, а в 1920 г. достигла уже 20 000—60 000 квт в единице.

Увеличение скорости вращения диктовалось не только тем, что при этом возрастала экономичность турбин, но и значительным уменьшением веса и габаритов турбогенератора. Так, турбогенератор с $n=3\,000$ об/мин на 25% легче машины такой же мощности, но с $n=1\,500$ об/мин.

В последующие годы совершенствование методов расчета и технологии производства машин, а также использование более высококачественных магнитных и изоляционных материалов, применение более эффективных способов вентиляции позволили повысить надежность и экономичность машин при значительном снижении их веса и экономии активных материалов.

Так, например, внедрение сварных корпусов турбогенераторов вместо литых привело к уменьшению веса машин почти на одну треть и значительно сократило производственный цикл. Применение двухслойной обмотки с конусным расположением ее лобовых частей (вместо расположения лобовых частей перпендикулярно оси машины) позволило на 20% сократить расход меди. Значительному повышению надежности обмотки ротора способствовало внедрение «запечки»¹ роторной обмотки.

В течение первой четверти XIX в. почти в 5 раз снизился вес турбогенераторов на единицу мощности. Например, по данным фирмы «Дженерал Электрик» турбогенератор мощностью 5 000 квт, впервые построенный в США в начале XX в., весил 102 т, а в 1920 г. генератор той же мощности весил 21 т.

¹ При этом заложенные в пазы ротора проводники при их запрессовке одновременно нагреваются проходящим по ним током.

¹ Первый турбогенератор был построен в 1884 г. (Ч. Парсонс).

Исключительно важную роль в повышении технико-экономических показателей турбогенератора (так же как и других крупных электрических машин) играет совершенствование методов вентиляции, так как при увеличении электромагнитных нагрузок машины заметно возрастает нагрев обмоток, причем необходимость интенсификации охлаждения возрастает с увеличением мощности машины. Для турбогенераторов вначале применялась протяженная воздушная система вентиляции, но вследствие ее недостатков (наличие в воздухе пыли, влаги и т. п. вредно отражается на работе машины)¹ эта система была заменена вентиляцией по замкнутому циклу. В настоящее время все турбо- и гидрогенераторы мощностью свыше 4000 ква имеют замкнутую систему вентиляции.

Замкнутая система вентиляции позволила применить в качестве охлаждающего газа водород. Именно применение водородного охлаждения способствовало значительному прогрессу в мощном турбогенераторостроении за последние два десятилетия. Дело в том, что с ростом мощности и скорости вращения машин заметно возрастают вентиляционные потери и потери на трение ротора о воздух. Преимущества водородного охлаждения обуславливаются тем, что плотность водорода почти в 10 раз меньше плотности воздуха, а теплопроводность его в 7 раз больше, чем у воздуха. Использование водородного охлаждения позволяет увеличить мощность машины на 25—30%, заметно повысить к. п. д. (на 1% и более), увеличить срок службы машины. Так, например, для турбогенератора (с водородным охлаждением) 100 000 кВт при 3000 об/мин к. п. д. возрастает на 0,8—1,2% при полной нагрузке и еще больше при меньших нагрузках. В турбогенераторе 200 000 кВт потери на трение о воздух и на вентиляцию при воздушном охлаждении составляют 1195 кВт, а при водородном — только 140 кВт.

Первые попытки применения водородного охлаждения электрических машин относятся к 1923 г. (США). Затем эта система вентиляции была испытана на ряде крупных синхронных компенсаторов, и только с 1936—1938 гг. стали выпускаться (в США) мощные турбогенераторы с водородным охлаждением. В нашей стране работы по освое-

¹ Насколько велико количество пыли, проносимой вентилирующим воздухом через генератор, можно судить хотя бы по такому примеру: если в генераторе задержится лишь 1% пыли, пронесенной через машину воздухом, то в течение года в генераторе мощностью 30 000 кВт оседет около 20 кг пыли.

нию водородного охлаждения проводились еще до Великой Отечественной войны 1941—1945 гг.

В 1943 г. на заводе «Электросила» началось проектирование крупнейшего для того времени турбогенератора мощностью 100 тыс. кВт, 3000 об/мин с водородным охлаждением, который был построен в 1946 г.*; в 1952 г. завод

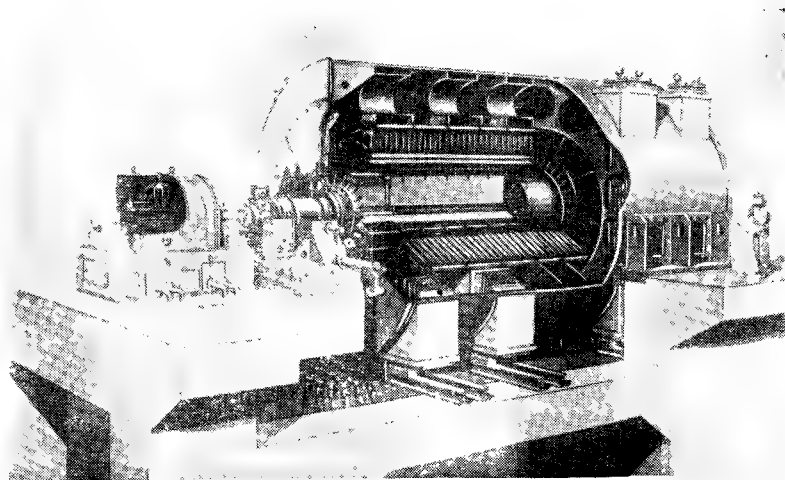


Рис. 13-7. Современный мощный турбогенератор с водородным охлаждением.

«Электросила» изготовил уникальный турбогенератор с водородным охлаждением на 150 тыс. кВт и 3000 об/мин, а в 1958 г. был построен турбогенератор 200 тыс. кВт с форсированной системой охлаждения (рис. 13-7). Прогресс отечественного турбогенераторостроения характеризуется, в частности, тем, что вес турбогенератора на 200 тыс. ква меньше веса турбогенератора на 150 тыс. ква, а использование активных материалов в нем повышено более чем в полтора раза.

* До этого наиболее крупным турбогенератором, построенным заводом «Электросила», был турбогенератор на 100 тыс. ква, 3000 об/мин с воздушным охлаждением (1937 г.). Эта машина до настоящего времени является наиболее мощной в мире из всех турбогенераторов на 3000 об/мин с воздушным охлаждением. Турбогенератор был построен для Сталингорской ГРЭС; во время войны он был эвакуирован на Челябинскую ГРЭС, где работает до настоящего времени. За 20 лет эксплуатации турбогенератор не имел ни одной аварии.

Рост единичной мощности турбогенераторов за последние три десятилетия наглядно иллюстрируется развитием турбогенераторостроения в СССР (диаграмма на рис. 13-8). Рис. 13-9 показывает рост к. п. д. с увеличением мощности турбогенераторов.

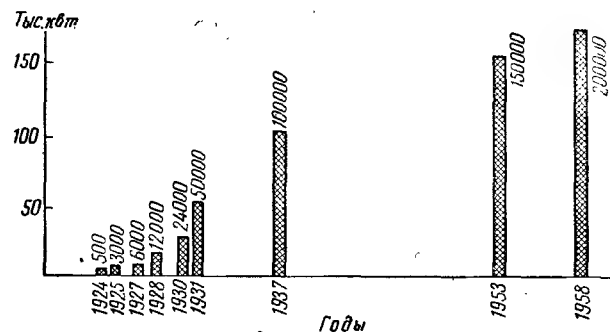


Рис. 13-8. Развитие турбогенераторостроения в СССР.

Однако дальнейшее увеличение мощности турбогенераторов уже не может осуществляться за счет увеличения их размеров. Установлено, что по условиям механической прочности и виброустойчивости роторов размеры машин, имеющих диаметр ротора до 1,1 м и активную длину 6 м,

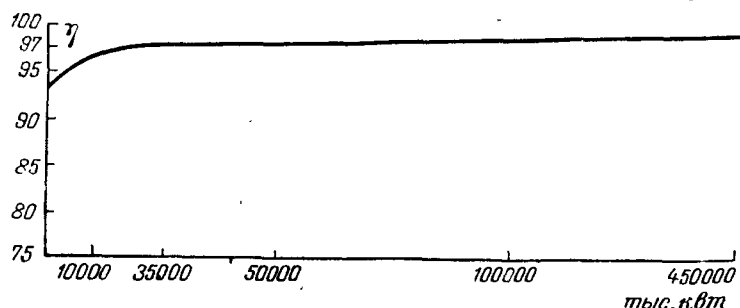


Рис. 13-9. Рост к. п. д. с увеличением мощности турбогенераторов.

являются предельными. Так, например, активная длина машины не должна превосходить диаметра ротора более чем в 6 раз, так как она ограничивается величиной статического прогиба и вибрационными характеристиками роторной системы.

Поэтому увеличение мощности турбогенераторов может быть достигнуто либо за счет повышения электромагнитных нагрузок или механических характеристик материалов, из которых изготавливается ротор машины, либо осуществлением более эффективного охлаждения обмоток.

Для роторов крупных турбогенераторов, испытывающих высокие механические напряжения, применяется легированная сталь (в основном никелевая) с добавкой хрома, молибдена и ванадия. Поковка ротора подвергается сложной термической обработке. Значительные окружные скорости ротора вызвали необходимость использования более легких проводниковых материалов, например проводникового алюминия.

В 50-х годах текущего столетия были разработаны методы более интенсивной форсированной водородной системы охлаждения обмоток статора и ротора, при которых осуществляется нагнетание водорода (при повышенном давлении до 2 атм) через каналы в проводниках обмотки. Преимущества форсированного охлаждения обуславливаются непосредственным контактом охлаждающего газа с медью обмоток. Первый турбогенератор 60 000 кВА с форсированным охлаждением ротора был испытан в 1951 г. в США¹.

На рис. 13-10 показано увеличение коэффициентов использования турбогенераторов с обычным воздушным охлаждением (кривая А) и водородным охлаждением (кривая В). Цифры 1, 2, 3 показывают увеличение эффекта, достигнутого при постепенном улучшении форсированного охлаждения статора и ротора [давление водорода повышалось с 0,035 (1) до 1,75 атм (3)].

На основании экспериментальных данных можно заключить (в частности, для турбогенератора 60 000 кВт),

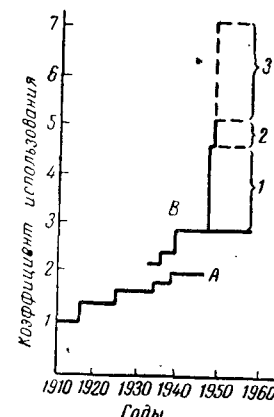


Рис. 13-10. Увеличение коэффициентов использования турбогенераторов за последние 40 лет (за единицу принята величина коэффициента в 1910 г.).

¹ Первые предложения непосредственного охлаждения обмоток относятся к 1909—1918 гг.

что применение форсированного охлаждения позволило уменьшить общий вес генератора на 25%; вес активных материалов снизился на 40%. Однако применение форсированного охлаждения приводит и к некоторым отрицательным явлениям, снижающим технико-экономические показатели машин (например, рост потерь на возбуждение). Над разрешением этих проблем работают ученые и инженеры-электромашиностроители.

Установлено, что применение форсированного внутреннего водородного охлаждения позволит при сохранении предельных размеров машин почти вдвое увеличить их мощность. Построенный в СССР турбогенератор на 200 тыс. кВт имеет форсированную охлаждающую систему. Сейчас разрабатываются турбогенераторы 300—400 и 600 (двухвальная турбина) тыс. кВт. Создание таких мощных машин потребует специальных высококачественных магнитных и изолирующих материалов и дальнейшего совершенствования систем охлаждения.

Развитие гидрогенераторов Гидрогенераторы относятся к классу тихоходных синхронных машин, скорость вращения которых находится в пределах 60—750 об/мин и определяется скоростью вращения гидравлических турбин. Сложность проектирования гидрогенераторов вызвана специфическими требованиями: параметрами водотока и характером гидросооружения. Небольшие скорости вращения гидрогенераторов обуславливают значительные размеры ротора при относительно малой его длине. Так, в гидрогенераторах отношение диаметра ротора к его активной длине превышает 10, тогда как в турбогенераторах это отношение снижается до 0,15.

Исторически сложились две основные конструкции гидрогенераторов: с горизонтальным валом (для скоростей вращения более 200 об/мин)¹ и вертикальным валом (для меньших скоростей вращения в низконапорных установках; в последнее время вертикальные машины стали строиться и для более высоких скоростей). Типовые гидрогенераторы большой мощности обычно выполняются с вертикальным валом, что определяется условиями общей компоновки гидросооружения.

Вертикальные гидрогенераторы еще с конца прошлого века стали изготавливаться двух типов: подвесной, в котором подпятник находится над ротором (наиболее распро-

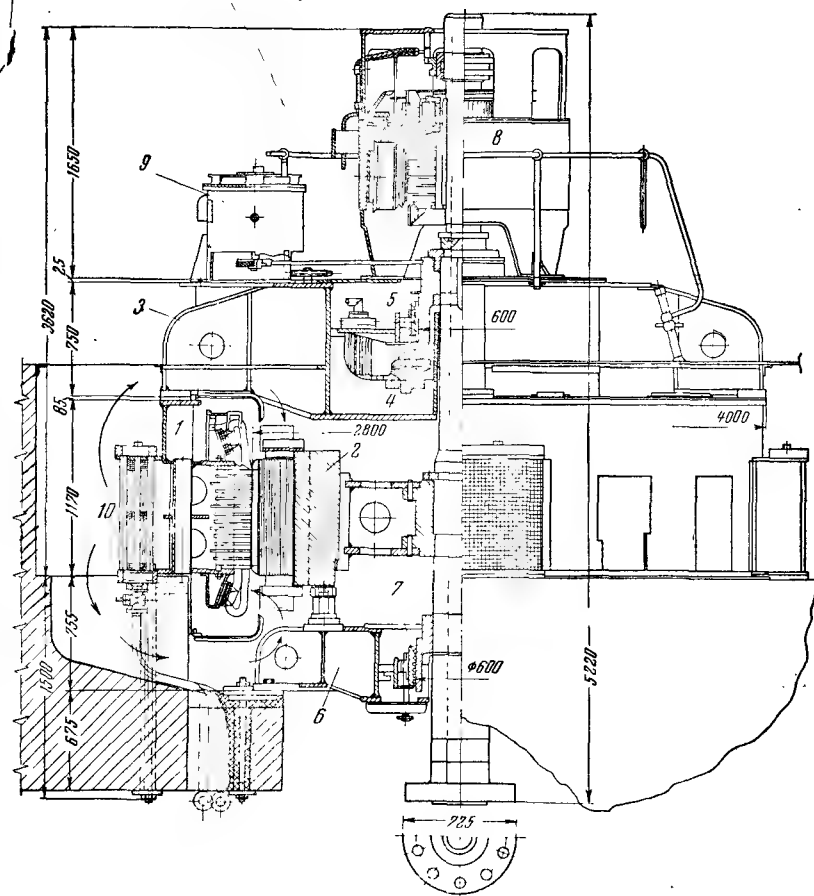


Рис. 13-11. Гидрогенератор подвесного типа.

страненный в течение первой трети текущего столетия) (рис. 13-11), и зонтичный с подпятником, расположенным под ротором (рис. 13-12).

Распространение гидрогенераторов зонтичного типа¹ в последние годы объясняется широким освоением энергии крупных равнинных рек (малые напоры при значительных расходах воды). Это вызывает необходимость установки

¹ Горизонтальные гидроагрегаты небольшой мощности иногда устанавливаются на совмещенных водосливных ГЭС.

¹ Впервые такая конструкция была разработана в начале 90-х годов XIX в.

тихоходных генераторов большой мощности. Изготовление подобных машин подвешенного типа связано со многими технологическими и производственными трудностями. Зонтичные же гидрогенераторы имеют ряд преимуществ перед машинами подвешенного типа: меньший вес и меньшая высота агрегата (а, следовательно, и высота машинного зала), удешевление стоимости здания для станций. Однако генераторы подвешенного типа являются наиболее надежными.

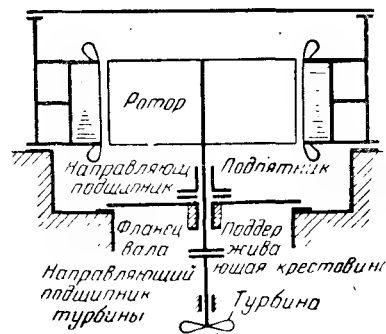


Рис. 13-12. Гидрогенератор зонтичного типа.

Размеры и вес гидрогенераторов одной и той же мощности приблизительно обратно пропорциональны скорости вращения, но очень большие скорости вызывают значительные механические напряжения в роторе.

Конструкция ротора, состоящего из вала, остова, обода и полюсов, претерпе-

ла ряд изменений. В настоящее время освоены два типа ободьев ротора: дисковый (неразъемный для машин при диаметре ротора до 4 м и разъемный при диаметре 4—8 м) и спицевый (при диаметре больше 8 м). В быстроходных генераторах обод ротора совмещается с остовом. Как правило, в последние годы остова ротора выполняется сварным и — реже — литым; корпус статора сварной из листовой стали.

Одним из самых сложных и ответственных узлов гидроагрегата являются подпятники, испытывающие огромные нагрузки в несколько тысяч тонн. Над их усовершенствованием работало много конструкторов и ученых.

В связи с ростом протяженности линий электропередачи все острее вставала проблема обеспечения статической и динамической устойчивости работы гидрогенераторов. Эта проблема могла быть разрешена путем ряда усовершенствований в конструкции гидрогенераторов. Одним из таких усовершенствований явилась разработка быстроотзывчивых систем возбуждения. В течение многих лет возбуждение гидрогенераторов осуществлялось, как правило, посредством электромашинных возбудителей, поме-

щенных на валу генератора. Вследствие большой магнитной инерции тихоходные возбудители не могли обеспечить быстрого нарастания возбуждения. Поэтому последовательно с ними стали включать быстроходные агрегаты добавочного напряжения с быстродействующими автоматическими регуляторами. В последние годы в связи с успехами в области выпрямительной техники начинают применяться ионные системы возбуждения с ионными преобразователями тока.

Развитие гидрогенераторов за последние 50 лет также характеризуется повышением единичных мощностей и технико-экономических показателей машин.

Успехи гидрогенераторостроения за последние десятилетия хорошо иллюстрируются достижениями Советского Союза (рис. 13—13). Основным источником гидроэнергетических ресурсов СССР являются крупные равнинные реки. Поэтому большинство гидроагрегатов, созданных в нашей стране, характеризуется значительными размерами и мощностями. По основным параметрам — единичной мощности, моменту вращения, нагрузке на подпятник, технологичности конструкций — отечественные гидрогенераторы не только не уступают, но в ряде случаев превосходят лучшие гидрогенераторы зарубежных фирм (см. таблицу).

Наименование станции	Мощность гидрогенератора, Мва	Скорость вращения, об/мин	Давление на подпятник, т	Общий вес, т
Волжская им. Ленина	123,5	68,2	3 400	1 650
Горьковская	71	62,5	2 000	1 080
Днепровская	90	83,3	1 000	986
Грэнд-Кули-Дэм (США)	108	120	—	—
Боулдер-Дэм (США)	82,5	180	910	—

Начало гидрогенераторостроения в нашей стране было положено сооружением гидрогенераторов для Волховской ГЭС в 1926 г. (8,7 Мва при 75 об/мин), конструкция которых находилась на уровне достижений мировой техники.

За истекшие три десятилетия конструкции гидрогенераторов претерпели значительные изменения и усовершенст-

ования. Тяжелые чугунные и стальные литые блоки (детали) были заменены более легкими сварными из листовой стали. Вместо литого обода ротора с начала 30-х годов стали собирать обод из стальных штампованных сегментов, что значительно снизило вес ротора, повысило его прочность и позволило сравнительно легко изготавливать ободья огромных размеров (до 14 м в поперечнике). Значительно улучшилась конструкция статорной обмотки:

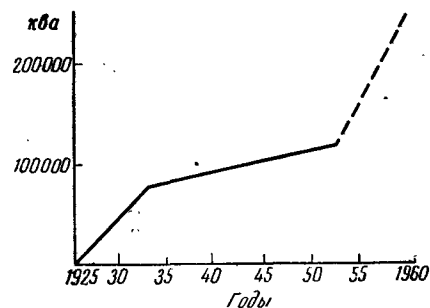


Рис. 13-13. Рост единичной мощности гидрогенераторов в СССР.

вместо многослойной катушечной нашла применение двухслойная обмотка корзиночного типа со стержнями или катушками одинаковой формы из проводов с асбестовой или стеклянной изоляцией. Корпусная изоляция смешанного типа (гильзовая в пазовой части и лакотканевая — в лобовой) была заменена (в 30-х годах) «непрерывной» изоляцией из

микаленты на асфальтовых лаках со специальной обработкой, что повысило электрическую прочность, теплопроводность изоляции и технологичность ее наложения.

За эти годы были освоены и значительно усовершенствованы гидрогенераторы зонтичного типа (уменьшены их вес и высота), что особенно наглядно иллюстрируется гидрогенераторами для Цимлянской ГЭС и Волжской ГЭС имени В. И. Ленина. Так, например, относительно тяжелая нижняя крестовина, опирающаяся на стенки турбинной шахты и достигавшая в некоторых генераторах веса более 100 т, была заменена легкой конусообразной опорой, установленной на крышке турбины; были усовершенствованы также направляющие подшипники и система их смазки.

Существенно улучшена была система вентиляции (применение встроенных в обод вентиляторов, повышение аэродинамических свойств основных звеньев вентиляционной цепи).

Большое внимание было уделено разработке специальной автоматической аппаратуры, обеспечивающей надежную эксплуатацию гидрогенераторов: автоматика заторма-

живания гидроагрегата, контрольная аппаратура смазки и т. п.

Для разгрузки пяти мощных гидрогенераторов при начальных сдвигах ротора в условиях пуска были созданы специальные электромагниты с подъемной силой до 1 200 т.

Все указанные, а также ряд других усовершенствований повысили технологичность, надежность и экономичность гидрогенераторов. Так, например, такой важный технико-экономический показатель, как удельный расход материалов, за последние 30 лет снизился в 2 с лишним раза.

Важно отметить, что гидрогенераторостроение в СССР в отличие от капиталистических стран носит характер серийного производства, что нашло отражение в конструкциях и технологии советских гидрогенераторов. Наряду со старейшими отечественными предприятиями — заводами «Электросила» и ХЭМЗ — в послевоенный период большие успехи в области серийного выпуска гидрогенераторов малых и средних мощностей были достигнуты на заводе «Уралэлектроаппарат», Новосибирском турбогенераторном заводе и др. На заводе «Уралэлектроаппарат», в частности, были разработаны более совершенные конструкции подпятников (на гидравлической опоре) и аппаратура ионной системы возбуждения для генераторов Рыбинской ГЭС и Волжской ГЭС имени Ленина.

Наиболее значительным достижением отечественного гидрогенераторостроения в последние годы является сооружение заводом «Электросила» уникальных гидрогенераторов для Волжской ГЭС имени Ленина. Диаметр статора этой крупнейшей для нашего времени машины превосходит 17 м, а вес достигает 1 600 т (рис. 13-14). При разработке этого гидрогенератора в результате творческого содружества многих предприятий нашей страны был решен целый комплекс сложных технических проблем. Была предложена новая компоновка гидрогенератора, при которой подпятник опирается непосредственно на крышку турбины через сравнительно легкую подставку конической формы. Эти гидрогенераторы оборудованы ионной системой возбуждения и схемой авторегулирования, обеспечивающими высокую форсировку возбуждения и, следовательно, устойчивую работу генераторов в аварийном режиме.

В последние годы отечественные заводы работали над созданием крупнейших гидрогенераторов для Сталинградской и Братской ГЭС. Так, на заводе «Электросила» еще в 1956 г. был разработан технический проект гидрогенератора для Братской ГЭС мощностью 200 Мвт (рис. 13-15).

Развитие
асинхронных
двигателей

Как уже отмечалось, создание асинхронного двигателя в конце XIX в. знаменовало новый этап в развитии промышленного электропривода. Особенно высокими качествами обладал короткозамкнутый двигатель (см. гл. 8). Однако, несмотря на его несомненные преимущества, дви-

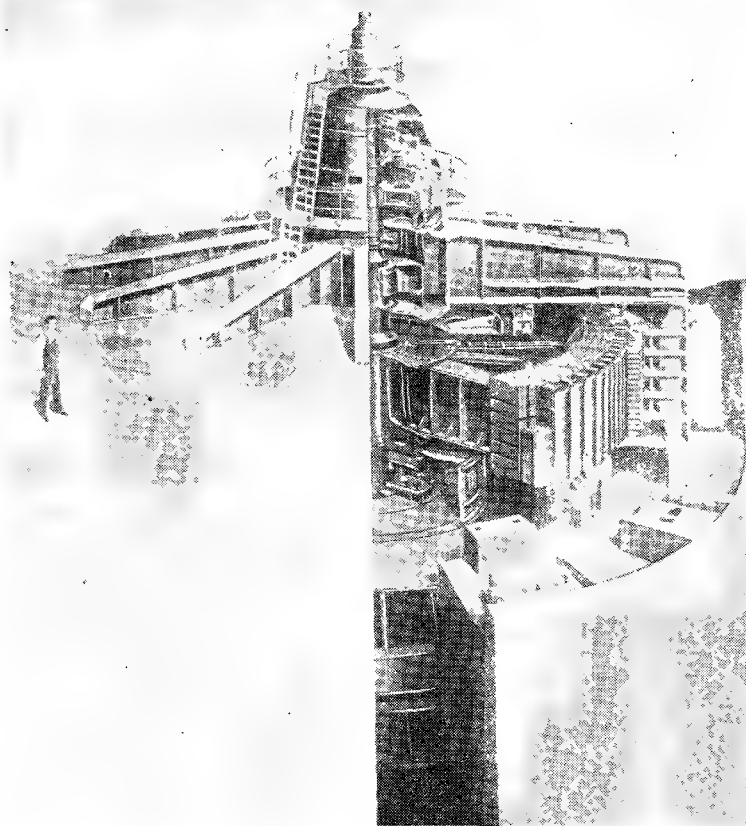


Рис. 13-14. Гидрогенератор Волжской ГЭС имени В. И. Ленина.

гатель в течение первых двух десятилетий текущего столетия не получил такого широкого распространения, которое, казалось бы, должен был бы иметь. Это было вполне закономерным, и оно в значительной степени определило направление творческой мысли ученых и инженеров, работавших над усовершенствованием асинхронного двигателя.

Как известно, пусковой ток короткозамкнутого двигателя достигает 5—7-кратной величины по отношению к номинальному. Поэтому в начале текущего столетия, когда мощности городских электрических станций и подстанций были сравнительно небольшими, включение мощных асинхронных короткозамкнутых двигателей в общую сеть резко

отзывалось на работе других приемников. В связи с этим в то время специальными инструкциями запрещалась установка короткозамкнутых двигателей мощностью более 2—5 квт. До середины 20-х гг. асинхронные двигатели мощностью более 5 квт, как правило, выполнялись с фазным ротором.

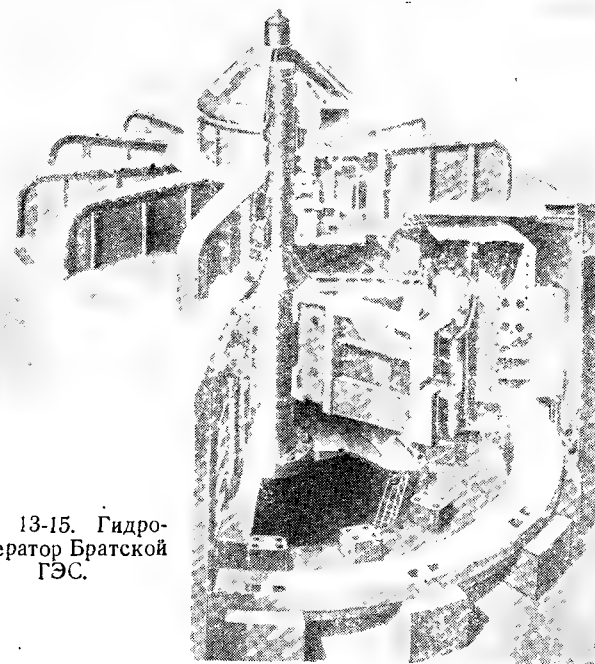


Рис. 13-15. Гидрогенератор Братской ГЭС.

Допустимое падение напряжения в сети при включении асинхронных короткозамкнутых двигателей является в настоящее время главным фактором, определяющим возможность установки мощных двигателей. Так, например, при совместном питании силовой и осветительной сети предельная мощность короткозамкнутых двигателей (при пуске от полного напряжения сети) должна составлять не более 22—29% мощности питающего трансформатора. В последние годы на многих заводах построены мощные электрические сети, допускающие непосредственное включение короткозамкнутых двигателей больших мощностей (несколько сотен киловатт).

Вот почему в течение первой четверти XX в. короткозамкнутый двигатель получил сравнительно небольшое применение в большинстве стран Европы (в США, где мощности электростанций были большими, этот тип двигателя применялся более широко).

Необходимость понижения пускового тока вызвала ряд конструктивных изменений в короткозамкнутом двигателе. В гл. 8 было показано, что впервые эта проблема получила свое разрешение в работах М. О. Доливо-Добровольского (позднее — в работах Бушера), создавшего двигатель с двойной беличьей клеткой.

В течение ряда последующих лет были разработаны различные модификации ротора с двойной клеткой. Фирма «Дженерал Электрик» построила ротор с обычными прямоугольными пазми с обмоткой, состоящей из трех слоев: нижний и верхний слои — медные стержни, средний — из мягкой стали. Изменяя толщину медных и стальных стержней, можно изменять величину пускового тока. Почти такой же ротор был предложен фирмой «Сименс-Шуккерт». Известна конструкция ротора с тройной беличьей клеткой. В других модификациях медные провода в пазу чередуются со стальными, провода пусковой обмотки — круглого сечения, а рабочей — прямоугольного. В роторе завода «Электросила» (30-е годы) провода пусковой обмотки выполнялись из бронзы или латуни (металлы с большим удельным сопротивлением, чем медь), что снижало перегрев обмотки при пуске двигателя. В другой конструкции ротора провода отливались из алюминия как одно целое с торцовыми кольцами; при этом алюминием заливается и узкая щель между проводами пусковой и рабочей обмоток, что способствует выравниванию температуры между обмотками (эта конструкция известна под названием обмотки с фасонными проводами). Двигатели с проводами фасонного сечения были своеобразной переходной конструкцией от двигателя с двойной беличьей клеткой к двигателю с глубоким пазом. Три последние модификации получили наибольшее применение.

Стремление упростить двигатель с двойной беличьей клеткой, а также устранить последствия неодинакового нагрева пусковой и рабочей обмоток (вследствие большего теплового расширения провода пусковой обмотки удлиняются больше проводов рабочей обмотки) привело к созданию короткозамкнутого двигателя с фасонными проводами, а затем двигателя с глубоким пазом, в который закла-

дываются узкие высокие медные стержни (рис. 13-16). Этот тип двигателя был впервые построен в США в 1913 г., но более совершенная его разработка относится к середине 20-х годов.

Глубина пазы возрастает при увеличении мощности машины. Так, например, в настоящее время в асинхронных двигателях мощностью более 120—150 кВт применяются пазы, глубина которых составляет 50 мм при ширине 5—6 мм. Двигатель с глубоким пазом конструктивно проще и дешевле двигателя с двойной клеткой, но его недостатком является несколько более низкий $\cos \phi$, обусловленный повышенным магнитным рассеянием ротора. Поэтому применение разных типов короткозамкнутых двигателей зависит от конкретных условий системы привода.

Опыт эксплуатации асинхронных двигателей, накопившийся в первой половине текущего столетия, показал, что обычные короткозамкнутые двигатели целесообразно выпускать до мощности 10 кВт, при больших же мощностях — двигатели с двойной беличьей клеткой или глубоким пазом; последние применяются в приводах с тяжелыми условиями пуска. В последнее время в силу большей простоты двигатель с глубоким пазом используется чаще двигателя с двойной клеткой во всех случаях, за исключением мощных приводов, требующих высокого пускового момента.

Что касается сопоставления короткозамкнутого и других типов асинхронного двигателя, то в нерегулируемых приводах мощностью до 100 кВт наиболее экономичным оказался короткозамкнутый двигатель. Так, например, по данным американской статистики, в 1936 г. 90% всех установленных двигателей мощностью до 100 кВт были короткозамкнутыми, в Англии — 75% всех двигателей 5—100 кВт и 95% двигателей до 5 кВт. В нашей стране в течение восстановительного периода (т. е. примерно до конца 20-х годов) наиболее распространенным был двигатель с кольцами, который затем стал все более вытесняться короткозамкнутым двигателем. Массовый выпуск двигателей

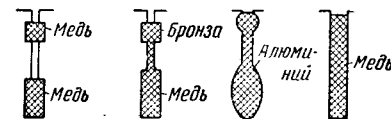


Рис. 13-16. Эволюция ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя с улучшенными пусковыми характеристиками от двойной беличьей клетки к глубокому пазу.

с двойной беличьей клеткой начался на заводе «Электрсила» в 1927 г.

Таким образом, одной из важнейших тенденций развития асинхронного двигателя в XX в. явилась разработка методов улучшения пусковых характеристик машин.

Помимо применения специальных короткозамкнутых двигателей, распространение получили разнообразные пусковые схемы обычных двигателей с короткозамкнутым ротором. Отметим здесь метод переключения обмотки ста-

тора с треугольника на звезду (на момент пуска; при этом пусковой ток снижается более чем в 3 раза) и автотрансформаторный пуск (в случаях, когда не требуется большой начальный момент).

Наряду с короткозамкнутыми двигателями значительное применение (особенно в первой трети текущего столетия) получили асинхронные двигатели с фазным ротором.

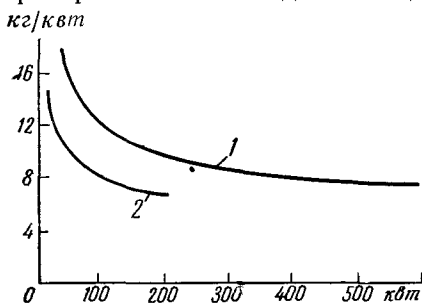


Рис. 13-17. Снижение удельного расхода материалов в функции от мощности двигателя.

1 — с фазным ротором; 2 — с короткозамкнутым ротором.

Хорошие пусковые характеристики являются важным преимуществом этого типа двигателя перед короткозамкнутым. Однако двигатель с кольцами имеет и ряд существенных недостатков, в результате которых целесообразность его установки определяется лишь невозможностью использования короткозамкнутого двигателя. К этим недостаткам относятся: более низкие энергетические показатели — $\cos \phi$ и к. п. д., сложность в эксплуатации, сравнительно высокая стоимость (достаточно сказать, что в двигателях небольшой мощности стоимость пускового реостата почти равна стоимости самого двигателя). Степень использования материалов в машинах с фазным ротором меньше, чем в короткозамкнутых (рис. 13-17).

Для улучшения пусковых характеристик двигателя с кольцами, кроме использования пускового реостата, применяются и другие методы: включение индуктивного сопротивления в цепь ротора, включение реостата в цепь ротора через трансформатор и др.

Рассматриваемый период развития асинхронных двига-

телей характеризуется также совершенствованием методов регулирования скорости вращения двигателей. Как известно, в регулируемых приводах преимущественное распространение имеют двигатели постоянного тока. Однако в ряде случаев по технико-экономическим соображениям оказывается целесообразным использование двигателей переменного тока.

В течение первой половины текущего столетия были разработаны и освоены различные способы регулирования скорости вращения асинхронных двигателей, из которых рассмотрим лишь один — переключение числа полюсов, так как он предусматривает определенные усовершенствования в конструкции обмотки статора короткозамкнутого двигателя.

Располагая в пазах статора независимые друг от друга обмотки с различными числами полюсов и подключая эти обмотки к сети, можно получить различные скорости вращения двигателя¹.

Асинхронные двигатели с несколькими ступенями скорости вращения получили название многоскоростных и широко применяются в электроприводах. Обычно такие двигатели имеют две, три или четыре различные скорости. Применение многоскоростных двигателей в электроприводах станков значительно упрощает конструкцию станков (могут исключаться коробки скоростей) и управление ими, повышает к. п. д. станков. Серийный выпуск многоскоростных двигателей в нашей стране был начат в 1933 г. С развитием машиностроения и станкостроения использование многоскоростных двигателей будет еще более расширяться.

Можно также отметить способ регулирования скорости вращения с помощью каскадных соединений двух асинхронных машин, позволяющий получить три устойчивые ступени скорости вращения².

Развитию асинхронных двигателей в рассматриваемый период также свойственна основная тенденция прогресса электромашиностроения вообще — максимальное использование активных материалов, совершенствование методов

¹ Обмотки с переключением числа пар полюсов были введены в 1897 г.

² Каскадное соединение двух асинхронных машин впервые было предложено в 1893 г. независимо друг от друга Ч. П. Штейнметцем и Г. Гергесом.

расчета и конструирования машин, повышение их технико-экономических показателей.

Среди наиболее существенных конструктивных усовершенствований асинхронного двигателя можно отметить следующие: уменьшение толщины стенок статора и подшипниковых щитов; замена литых корпусов сварными (что не только снизило вес, но и повысило технологичность машины); применение шарикоподшипников (что позволило значительно уменьшить воздушный зазор), внедрение двух-

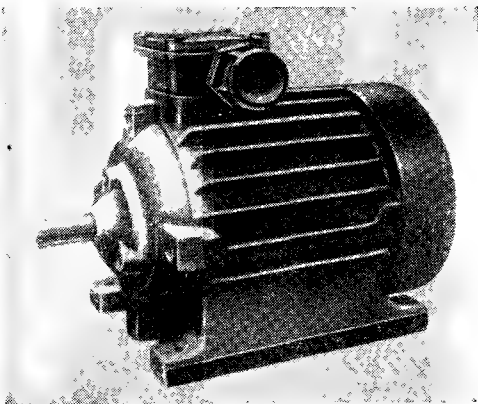


Рис. 13-18. Взрывобезопасный двигатель типа БАО с чугунным ребристым корпусом (1930 г.).

слойных шаблонных обмоток с укороченным шагом (в результате чего снизился до 15% расход меди, сократились аксиальные размеры и уменьшились потери от высших гармоник) и стекловолкнистой изоляции на теплостойком лаке в машинах, работающих в тяжелых условиях.

Значительные улучшения были внесены в систему вентиляции двигателей; были внедрены аксиальная и радиальная системы, а также принудительное охлаждение поверхности статора машин закрытого типа.

Снижение веса двигателей за последние 60 лет, а также рост использования машин иллюстрируются рис. 13-1 и 13-17.

Следует, однако, отметить, что стремление к максимальной экономии металлов и вызванное этим повышение электромагнитных нагрузок машины (в частности, имевшее место в 20-х годах) привели к заметному снижению

cos ϕ двигателя. В последующем необходимость повышения к. п. д. и cos ϕ двигателя вызывала в ряде случаев увеличение расхода активных материалов.

Для развития асинхронных двигателей является также характерным широкое разнообразие их конструкций, создание самых различных типов специальных двигателей: вертикальных; с повышенным скольжением; для работы под водой; для взрывоопасных (рис. 13-18), пыльных, химических производств; для использования в медицине, в быту, военном деле и многих других отраслях.

Асинхронные машины являются наиболее распространенными (в особенности двигатели мощностью 0,6—100 кВт). Только в СССР годовой выпуск асинхронных двигателей по мощности составляет несколько миллионов киловатт. Необходимость высокой технологичности и экономичности этих машин обусловлена их массовым серийным производством.

Развитие трансформаторов

Трансформатор является одним из важнейших и наиболее распространенных элементов энергосистем и электроустановок. На 1 кВт установленной мощности генераторов в современных электрических системах падает 3,5—7 кВА трансформаторной мощности.

По мере роста мощностей и напряжений линий электропередачи и развития электрификации промышленности и транспорта роль трансформатора все возрастала.

Уже в начале XX в. возникла необходимость в разработке конструкций мощных трансформаторов для сетей 110, а позднее 220 кВ и более. В связи с этим научная и инженерная мысль была направлена на: создание разнообразных конструкций трансформаторов с увеличенным числом обмоток, разработку методов увеличения электрической прочности изоляции, исследование электромагнитных процессов, возникающих в трансформаторах при коротких замыканиях и перенапряжениях, улучшение способов охлаждения; разработку эффективных систем регулирования трансформаторов под нагрузкой и совершенствование методов расчета трансформаторов. Необходимо было также освоить специальные трансформаторы, номенклатура которых значительно расширялась в связи со все большим проникновением электрической энергии в различные отрасли хозяйства.

Выше уже отмечалась основная тенденция в развитии электромашиностроения в текущем столетии — снижение

веса машин и трансформаторов на единицу мощности. Эта тенденция получила свое дальнейшее развитие на основе достижений электротехники в последние три десятилетия (рис. 13-9).

Основные конструктивные типы современных трансформаторов — стержневой и броневой — были разработаны в середине 80-х годов прошлого века (см. гл. 6).

В первых конструкциях трансформаторов первичная и вторичная обмотки находились на разных сердечниках магнитопровода, но при этом не весь магнитный поток первичной обмотки пронизывал

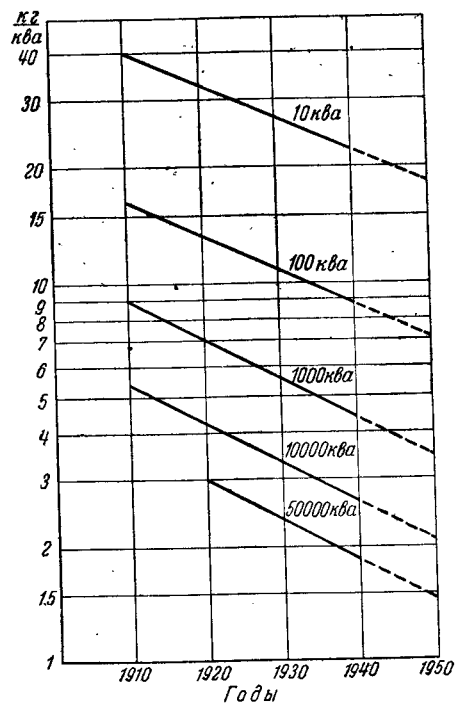
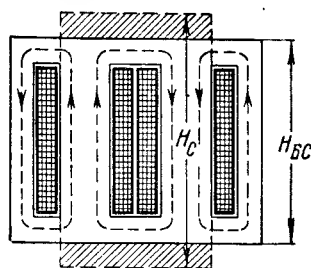


Рис. 13-19. Постепенное снижение веса единицы мощности масляных трансформаторов (по данным зарубежного трансформаторостроения).



Сис. 13-20. Многоствержневой трансформатор (однофазный).

вал витки вторичной обмотки. Поэтому в дальнейшем на каждом из сердечников стали помещать части первичной и вторичной обмоток, располагая их концентрически. Кроме того, для уменьшения магнитного рассеяния в некоторых конструкциях трансформаторов (чаще — в броневых) первичная и вторичная обмотки разбиваются на отдельные катушки, располагаемые на стержне в чередующемся порядке (дисковые чередующиеся обмотки).

Трансформаторы стержневого и броневые типы сохранились до настоящего времени, причем стержневой тип по-

лучил преобладающее применение. Стержневые трансформаторы имеют по сравнению с броневыми сердечники большей длины при меньшем сечении. Как правило, они несут концентрическую обмотку, изготовление которой дешевле, чем дисковой. Еще одним преимуществом стержневых трансформаторов можно считать более легкий и простой ремонт. С другой стороны, дисковые обмотки более целесообразны в случае необходимости широких пределов регулирования напряжения, а также в трансформаторах на очень большие токи (например, трансформаторы для электрических печей).

Весьма характерным в трансформаторостроении последнего времени является объединение преимуществ стержневых и броневых типов в одной конструкции. Так, современные трансформаторы большой мощности (до 100 тыс. кВа в одной фазе) и высокого напряжения (до 220—400 кВ) выполняются в виде бронестержневой или многостержневой конструкции с разветвленной магнитной системой (рис. 13-20). При этом снижается высота сердечника и облегчается перевозка трансформаторов в собранном виде по железной дороге.

Одной из характерных тенденций в практике использования трансформаторов является установка одного или нескольких мощных трансформаторов вместо большого числа малых трансформаторов той же суммарной мощности, в результате чего снижаются вес и стоимость активных материалов на 1 кВа, а также потери на единицу мощности.

За последние годы все шире начинают применяться многообмоточные трансформаторы. Такие трансформаторы устанавливаются в энергосистемах, а также в радиотехнических схемах и автоматических устройствах, когда возникает необходимость во взаимной связи нескольких цепей или систем переменного тока разных напряжений. Многообмоточные трансформаторы могут иметь либо одну первичную и две или несколько вторичных обмоток, либо две или несколько первичных и одну вторичную обмотки. Наибольшее применение получили трансформаторы первого типа, называемые трехобмоточными (по числу обмоток). Один трехобмоточный мощный трехфазный трансформатор заменяет два отдельных обычных трансформатора и позволяет получить на двух вторичных обмотках напряжения для питания потребителей, удаленных от электростанции на разные расстояния.

Совершенствование обмоток трансформаторов шло в направлении повышения их механической и электрической прочности, нагревостойкости, экономичности и технологичности изготовления. В частности, в нашей стране еще в 1940 г. были освоены простые конструкции емкостной защиты обмоток, повысившей их импульсную прочность. С этого времени все трансформаторы на напряжение 110 кВ и выше строятся грозоупорными.

Одним из важных направлений в совершенствовании конструкции трансформаторов явилось улучшение системы охлаждения.

Как известно, по способу охлаждения трансформаторы разделяются на сухие с естественным или искусственным охлаждением (посредством специальных вентиляторов) и масляные, в которых масло не только охлаждает сердечник и обмотку, но и улучшает изоляцию обмоток и предохраняет их от влаги и пыли.

При мощности трансформаторов до 20 кВА масляный бак делается гладким. Но с ростом мощностей трансформаторов пришлось бы значительно увеличить размеры бака. Эта задача была решена за счет изготовления стенок бака из волнистого железа, что значительно увеличивало поверхность бака. При мощностях свыше 7500 кВА баки с волнистыми стенками становились настолько непрочными (с возрастанием мощности трансформатора глубина волнистости увеличивалась), что пришлось перейти к новым конструкциям — гладким бакам с вваренными в их стенки трубами (20-е годы). При достижении мощностей трансформаторов до 15—20 тыс. кВА подобная конструкция баков стала осложнять транспортировку трансформаторов. В связи с этим были разработаны специальные охладители — радиаторы, которые легко снимались при перевозке. Однако при радиаторной охладительной системе вес и габариты трансформаторов значительно возросли. Стремясь снизить эти параметры, конструкторы создали масляные трансформаторы с искусственным водяным охлаждением (по змеевику, помещенному в бак, проходит охлаждающая вода). Но при этом надежность трансформатора значительно снизилась, так как при порче змеевика вода попадала в масло.

Наиболее радикально проблема охлаждения была решена в 30-х годах, когда были разработаны система с принудительной циркуляцией масла и охлаждением его в особых охладителях, а также система форсированного

дутьевого охлаждения посредством вентилятора, применяемая в мощных трансформаторах. Искусственное дутье позволяет увеличить мощность трансформатора до 30%. Для сверхмощных трансформаторов применяется воздухомасляное охлаждение.

Область применения сухих трансформаторов расширилась за счет использования стеклянной изоляции, пропитанной силиконовым лаком; такая изоляция допускает работу до температур порядка 180°С.

Значительный прогресс в трансформаторостроении за последние годы (с начала 50-х годов) был обусловлен внедрением новых, более качественных материалов и, в частности, холоднокатаной электротехнической стали для изготовления сердечников. Эта сталь характеризуется высокой магнитной проницаемостью и малыми магнитными потерями. В результате использования холоднокатаной стали сечение и вес сердечников уменьшились, а потери в трансформаторе снизились на 20%. Это позволило уменьшить габариты охладительной системы (баки, радиаторы), в результате чего сократился общий вес трансформаторов. Большое распространение получили (в особенности в США) броневые и стержневые трансформаторы, сердечник которых намотан из ленточной холоднокатаной стали. Конструкция таких трансформаторов отличается высокой технологичностью и удобством для массового производства. Внедрение холоднокатаной стали знаменует новый этап в развитии трансформаторостроения.

Совершенствование методов расчета и технологии производства трансформаторов позволило увеличить их единичную мощность и заметно уменьшить габариты и потери в мощных трансформаторах высокого напряжения (220—400 кВ) (рис. 13-21 и 13-22). Наиболее мощными трансформаторами, созданными в СССР, являются трехобмоточные трансформаторы 3×123 500 кВА, 420 кВ, установленные на Волжской ГЭС имени Ленина (рис. 13-23), а также трансформаторы 180 МВА в единице на 220 кВ.

Большим достижением в конструировании трансформаторов следует признать освоение частично или полностью автоматизированных переключающих устройств, позволяющих регулировать напряжение под нагрузкой без разрыва цепи тока.

За последнюю четверть века сильно развилось производство трансформаторов специального назначения: для преобразования числа фаз переменного тока (в электро-

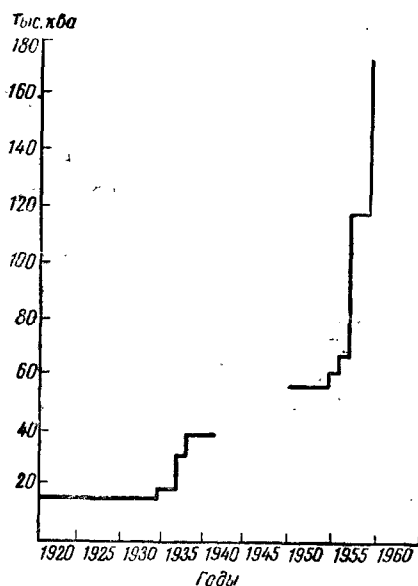


Рис. 13-21. Рост единичной мощности трансформаторов за последние 40 лет.

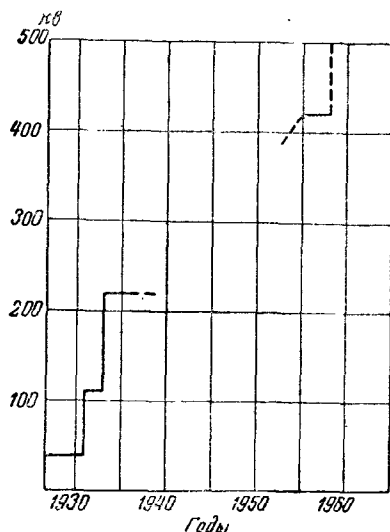


Рис. 13-22. Рост напряжений силовых трансформаторов в СССР.

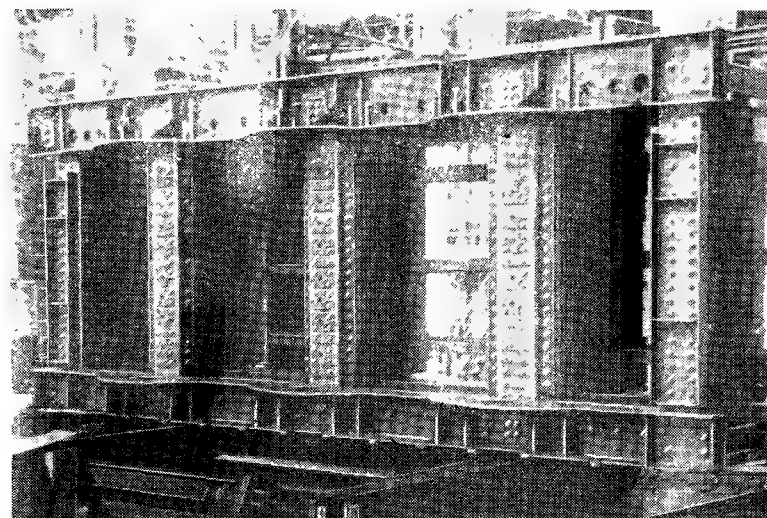


Рис. 13-23. Магнитопровод однофазного трехобмоточного трансформатора мощностью 123,5 Мва, 420 кВ.

печных установках), для выпрямительных установок, для преобразования частоты (удвоение и утроение частоты), для плавного регулирования напряжения и др. В радиотехнике, в устройствах промышленной электроники применяются специальные трансформаторы малой мощности. Выпускаются также разнообразные конструкции измерительных трансформаторов тока и напряжения.

В последнее время все более расширяется область применения автотрансформаторных схем, которые используются не только в пусковых трансформаторах (как это было в прошлые годы), но и в мощных силовых трансформаторах. Это объясняется прежде всего рядом преимуществ автотрансформаторов (меньший расход материалов и сниженные потери, уменьшение реактивности), а также разработкой методов некоторой локализации недостатков, присущих автотрансформаторам (например, переход перенапряжений из одной обмотки в другую). В СССР построены мощные автотрансформаторы: 180 Мва, 154/110 кВ в единице и трехфазные группы 500 Мва, 420/220 кВ.

В последние годы ведутся интенсивные исследования в направлении дальнейшего повышения единичной мощности трансформаторов, увеличения производства трансфор-

магоров с переключением напряжения под нагрузкой, создания трансформаторного оборудования для сетей постоянного тока высокого напряжения. В СССР, в частности, разрабатываются трансформаторы на 220 кВ до 300—400 МВА в единицу и трансформаторное оборудование для линий трехфазного тока 500 кВ и постоянного тока 800 кВ.

13-2. РАЗВИТИЕ ОТКЛЮЧАЮЩИХ АППАРАТОВ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

На всех этапах развития электроэнергетики одной из наиболее сложных проблем являлось отключение мощных электрических цепей. Высокие требования, предъявляемые к выключателям, вытекают из их функции надежно и быстро отключать электрические цепи не только под нагрузкой, но также и в аварийных условиях, например при коротких замыканиях, когда чрезмерное возрастание токов грозит разрушением основного оборудованию электрических станций. Рассмотрим основные направления развития выключателей.

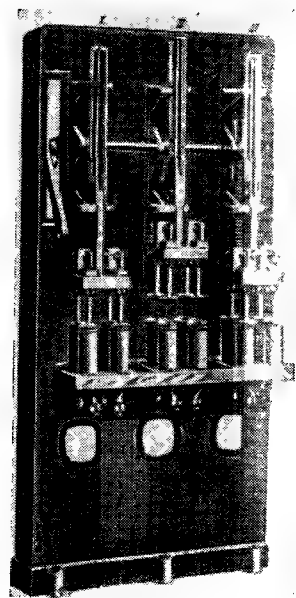


Рис. 13-24. Выключатель со ртутными контактами.

Простейшая коммутационная аппаратура в виде различных переключателей появилась примерно в 20-х годах прошлого столетия в период интенсивного изучения действий электрического тока. Обычным типом контактных соединений в этих переключателях являлись металлические стержни, опускавшиеся в сосуды со ртутью. Достаточно вспомнить двигатель Дж. Генри (см. рис. 4-14) или «кормысло Ампера» (см. рис. 4-28), чтобы предста-

вить себе ранние устройства, предназначенные для изменения направления тока.

С возникновением энергетических применений электрического тока начинают создаваться различные конструкции выключателей, сначала на низкие, а затем на все более

высокие напряжения. Для всех выключателей, применявшихся до начала 90-х годов, характерным было наличие ртутных контактов. Такие выключатели, например, были установлены в 1887 г. на электростанции в Риме, которая работала на линию передачи с напряжением 2 кВ и током 200 А. На рис. 13-24 представлен внешний вид одного из выключателей с ртутными контактами. Очевидные недостатки этих выключателей, которые из-за применения ртути были дорогими и нетранспортабельными, обладали

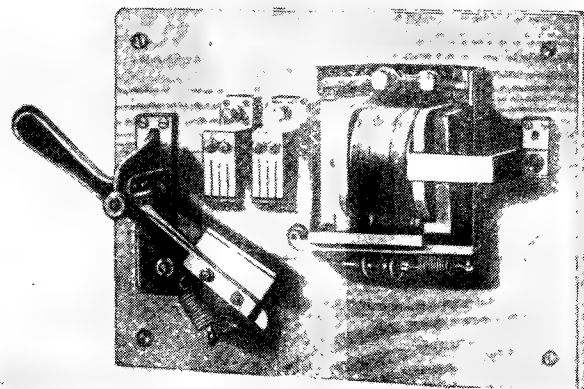


Рис. 13-25. Выключатель с пружинящими пластинчатыми контактами.

большим весом и обеспечивали надежное отключение только при многократном разрыве цепи тока¹, заставляли искать более совершенную конструкцию контактных элементов.

В 90-х годах прошлого столетия были разработаны различные конструкции подвижных контактных элементов. Например, в 1893 г. на Чикагской всемирной выставке М. О. Доливо-Добровольский демонстрировал максимальный автоматический выключатель, в котором впервые были применены пластинчатые пружинящие (рубящие) контакты. На рис. 13-25 показан этот выключатель. Массивный медный нож (подвижный контакт) входил в соприкосновение с пластинчатыми пружинящими контактами, замыкая тем самым цепь тока; нож под действием

¹ Идею одновременного многократного разрыва цепи для облегчения процесса отключения высказал еще в 1880 г. Т. Эдисон.

пружины стремился выйти из контактов и удерживался во включенном состоянии защелкой, механически связанной с якорем электромагнита. Когда ток достигал установленной величины, якорь притягивался (так как обмотка электромагнита включалась последовательно в цепь тока); защелка при этом отводилась и освобождала нож. Настройка аппарата производилась винтом, который регулировал натяжение пружины (расположена под электромагнитом), удерживающей защелку с якорем. Со временем наравне с пружинящими контактами стали применять торцовые, щеточные, розеточные и пальцевые контактные соединения.

При отключении электрических цепей силовых установок возникает электрическая дуга, которая разрушает контакты, опасна в пожарном отношении и усложняет процесс отключения. Вся история развития выключателей тесно связана с изучением электрической дуги и способов ее гашения.

В настоящее время различают две основные группы выключателей: безмасляные и масляные. В свою очередь масляные выключатели делятся на баковые (многообъемные) и маломасляные (малообъемные). Безмасляные выключатели могут быть различных типов в зависимости от той среды, которая используется для гашения электрической дуги; основными типами безмасляных выключателей являются водяные, автогазовые и воздушные. Особенность исторического развития выключателей состоит в том, что все перечисленные типы и группы выключателей возникли практически одновременно в 90-х годах прошлого столетия, но на каждом этапе своего развития те или иные типы выключателей играли различную роль.

**Выключатели
с гашением дуги
в воздухе**

Наиболее распространенными в конце XIX и начале XX вв. были выключатели с гашением дуги в воздухе.

В развитии этих выключателей можно выделить более ранний этап, для которого характерно применение выключателей с открытой дугой в воздухе, когда не предусматривалось применение каких-либо специальных средств для гашения дуги. К этому типу относятся рассмотренные выше выключатели со ртутными контактами и выключатель Доливо-Добровольского с пружинящими контактами. Есть сведения, что такие простейшие выключатели применялись для напряжений до 15 кВ и токов до 300 А. Выключатели со свободным горением дуги

в воздухе применялись до 1901 г. на Ниагарской гидроэлектростанции (рис. 13-26); от них отказались лишь в связи с тем, что в 1900 г. перевели линии Ниагарской ГЭС на напряжение 22 кВ и гашение дуги было уже надежным, даже несмотря на то, что открытие ножей было доведено до 1,8 м.

Открытое горение дуги в воздухе было опасно в пожарном отношении, а при неудачной конструкции распределительного устройства электрическая дуга иногда перекидывалась на основные шины станции и вызывала короткое замыкание. При напряжениях свыше 15 кВ выключатели порой не могли разорвать дугу и приходилось предусматривать возможно более быстрое ослабление возбуждения генераторов с тем, чтобы снизить напряжение. Дальнейшее развитие выключателей с гашением дуги в воздухе было возможно только при условии применения специальных дугогасительных устройств.

С 1895 г. началось применение роговых разрядников для защиты воздушных линий от перенапряжений. Рогообразные элементы отводили дугу в определенном направлении от места ее возникновения и благодаря тому, что дуга удлинялась и охлаждалась, способствовали ее гашению. В 1897 г. фирма «Броун-Бовери» сделала патентную заявку на выключатель с рогообразными контактными элементами. Схема, представленная на рис. 13-27, иллюстрирует принцип действия этого выключателя. Один из рогообразных контактов (левый) был неподвижным, а второй мог поворачиваться вокруг горизонтальной оси. При размыкании контактов возникавшая дуга под действием электродинамических сил и потоков нагретого воздуха выдувалась вверх. При этом длина дуги увеличивалась, сопротивление дугового промежутка возрастало; кроме того, процессу деионизации дугового промежутка способствовало интенсивное охлаждение дуги при ее движении в воздухе.

Вскоре роговые выключатели стали конструировать таким образом, что рога уже не выполняли роли токоведущих элементов, а являлись устройством, способствовавшим гашению дуги. На рис. 13-28 показан один из выключателей с роговыми дугогасительными устройствами, установленный около 1920 г. в США на линии 140 кВ.

Для ускорения перемещения дуги между рогами стали применять магнитное дутье, т. е. были разработаны конструкции камер выключателей, в которых с помощью

специальных катушек создавалось магнитное поле; дуга, представляющая собой своеобразный проводник с током, под действием электродинамических сил перемещалась в этом магнитном поле.

Примером дугогасительного устройства, в котором использовалось магнитное дутье, является устройство М. О. Доливо-Добровольского, показанное на рис. 13-29.

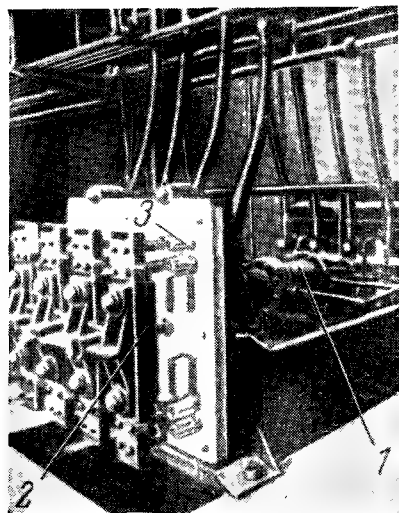


Рис. 13-26. Выключатель Ниагарской гидроэлектростанции (напряжение 2,25 кВ).

1 — приводной механизм; 2 — траверса; 3 — контакты.

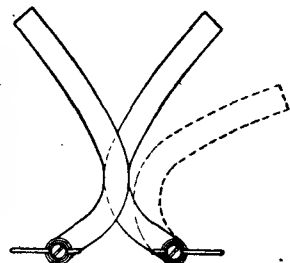


Рис. 13-27. Рогообразные элементы выключателя.

Для уменьшения габаритов выключателей и предотвращения выбрасывания дуги за пределы камеры аппарата Доливо-Добровольский в 1910 г. предложил ввести еще один новый элемент: установить на пути дуги ряд поперечных пластин из изоляционного материала.

На рис. 13-29 дано схематическое изображение такого выключателя, причем отчетливо видна цепь тока дуги, проходящего через катушки магнитного дутья. При отключении сначала разрываются рабочие контакты, а затем верхний дугогасительный контакт. Дуга, возникающая при разрыве дугогасительного контакта, поднимается по рогообразным элементам и волнообразно изгибается вокруг нижних кромок пластин. При этом длина дуги увеличивается и, кроме того, дуга охлаждается, прижимаясь к пластинам, обладающим большой теплоемкостью. Указанный принцип построения выключателей сохранился до настоящего време-

ни и используется, например, в воздушных электромагнитных выключателях с гребенчатыми камерами, изготовляемыми для напряжений 10 кВ, тока 600 а и отключаемой мощности 200—250 Мва (типа ВЭМГ-10).

Другим видом дугогасительных устройств выключателей с гашением дуги в воздухе являются деионные решетки. Идея применения решетки из металлических пластин,

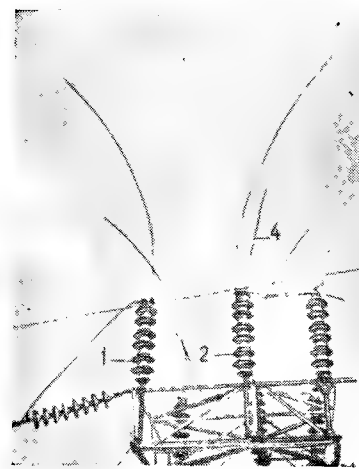


Рис. 13-28. Выключатель 140 кВ с роговыми дугогасительными устройствами.

1 и 2 — две неподвижные колонки с рогами из оцинкованных стальных труб; 3 — вращающаяся колонка для привода ножа 4.

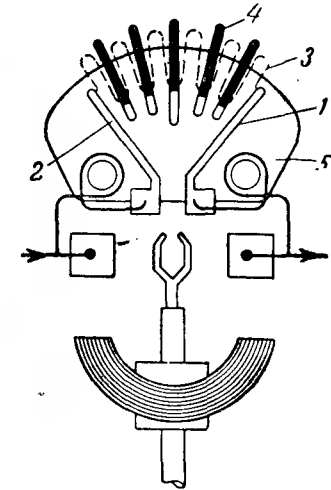


Рис. 13-29. Дугогасительное устройство М. О. Доливо-Добровольского.

1 — 2 — рогообразные элементы; 3 — дуга; 4 — пластины из изоляционного материала; 5 — задняя стенка камеры.

установленных на пути движения дуги, состоит в том, что дуга разбивается на ряд коротких дуг; при этом число пластин выбирается таким, чтобы напряжение на каждой частичной дуге было ниже напряжения, необходимого для нового пробоя промежутка после погасания дуги при прохождении тока через нулевое значение.

Быстрое гашение коротких дуг эмпирически было исследовано еще в 1896 г. и в более поздние годы использовалось в конструкциях роликовых и пластинчатых выключателей. В этих выключателях в цепь тока включались тесно прижатые друг к другу несколько металлических пластин или роликов. При отключении эти пластины или ролики расходились, образуя между собой воздушные за-

зоры. Возникавшие в этих зазорах короткие дуги обычно погасали при первом же прохождении тока через нулевое значение.

Деионная решетка в современном ее виде была изобретена в 1912 г. М. О. Доливо-Добровольским¹. На рис. 13-30 показана схема деионного выключателя. С 1928 г. американская фирма «Вестингауз Электрик», а затем и ряд других фирм начали выпускать выключатели с деионной решеткой на различные напряжения и отключаемые мощности. Деионные решетки находят также широкое применение в контакторах, рубильниках и разъединителях.

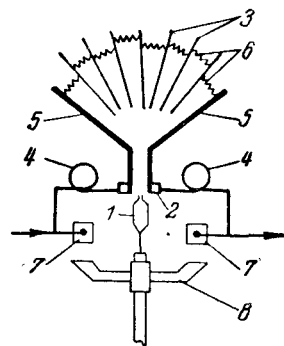


Рис. 13-30. Выключатель с деионной решеткой М. О. Доливо-Добровольского.

1 и 2—дугогасительные контакты; 3—поперечные металлические пластины, образующие решетку; 4—катушки магнитного дутья; 5—рога; 6—короткие дуги; 7 и 8—рабочие контакты.

Значительное применение в выключателях с гашением дуги в воздухе получила дугогасительная камера в виде узкой щели. Принцип гашения дуги при движении ее в сужающейся щели был предложен М. О. Доливо-Добровольским еще в 1914 г. Этот принцип можно легко уяснить себе при помощи схематических чертежей, представленных на рис. 13-31. Возникающая при разрыве контактов дуга создает магнитный поток, замыкающийся через металлические пластины и воздушный зазор. Магнитные линии, стремясь укоротиться, затягивают дугу в щель, причем по мере перемещения дуги магнитное поле усиливается (сокращается путь магнитного потока), а движение дуги ускоряется. При быстром движении дуги происходит ее интенсивное охлаждение и дуга рвется.

Рост мощностей электростанций и напряжений в линиях электропередачи предъявлял все более сложные требования к выключателям. Воздушные выключатели ранних конструкций были громоздкими, токоведущие части их

обязательно должны были находиться далеко одна от другой; выключатели проектировались так, чтобы они отключали лишь токи нагрузки. После того как в конце XIX — начале XX вв. начали строиться очень крупные по тому времени центральные станции и линии высокого напряже-

ния, когда потребовалось отключать не только рабочие токи, но и токи короткого замыкания, встал вопрос о переходе к более совершенным выключателям. Оказалось, что хорошей средой, способствующей быстрой деионизации дугового промежутка, является минеральное масло, которое и стало широко использоваться в масляных выключателях.

Высокие электроизоляционные свойства масел были известны с самого начала XIX в. (В. В. Петров). Но только на рубеже 80-х и 90-х годов были сделаны попытки использовать масло для охлаждения и изоляции трансформаторов (Д. Свинберн), а в начале 90-х годов — для отключающих аппаратов.

В первых конструкциях масляных выключателей (И. Томсон, Ферранти) и плавких предохранителей с масляным заполнением (Ферранти) разрыв контактов (или сгорание плавкой вставки) происходил в воздухе, а затем подвижный контакт уходил под слой масла. В качестве примера такого выключателя можно привести показанный на рис. 13-32 выключатель Ферранти, установленный в 1895 г. на Дептфордской электростанции. В этом выключателе впервые были применены специальные дугогасительные контакты.

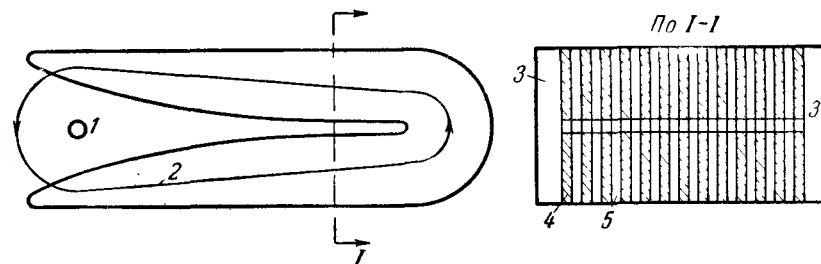


Рис. 13-31. Схема дугогасительного устройства, действующего на принципе затягивания дуги в узкую щель, образованную в пакете из металлических и изоляционных пластин.

1—след дуги; 2—путь магнитного потока; 3—боковые стенки камеры (на левой проекции убраны); 4—пластины из изоляционного материала; 5—металлические пластины (обычно утопленные в изоляцию).

Масляные выключатели

В первые конструкции масляных выключателей (И. Томсон, Ферранти) и плавких предохранителей с масляным заполнением (Ферранти) разрыв контактов (или сгорание плавкой вставки) происходил в воздухе, а затем подвижный контакт уходил под слой масла. В качестве примера такого выключателя можно привести показанный на рис. 13-32 выключатель Ферранти, установленный в 1895 г. на Дептфордской электростанции. В этом выключателе впервые были применены специальные дугогасительные контакты.

В первых конструкциях масляных выключателей (И. Томсон, Ферранти) и плавких предохранителей с масляным заполнением (Ферранти) разрыв контактов (или сгорание плавкой вставки) происходил в воздухе, а затем подвижный контакт уходил под слой масла. В качестве примера такого выключателя можно привести показанный на рис. 13-32 выключатель Ферранти, установленный в 1895 г. на Дептфордской электростанции. В этом выключателе впервые были применены специальные дугогасительные контакты.

¹ Процессы деионизации, происходящие при гашении дуги, описал в конце 20-х годов текущего столетия американский электротехник Слепян, которому долгое время необоснованно приписывалось и само изобретение деионной решетки.

Более совершенную конструкцию масляного выключателя разработал в 1898 г. швейцарский инженер Ч. Броун. Его выключатели, имевшие на каждую фазу два рабочих контакта и четыре дугогасительных, отключали токи до 80 а при напряжении до 14,5 кв. Дугогасительные контакты в выключателях Броуна находились глубоко под слоем масла и быстро разводились под действием пружин.

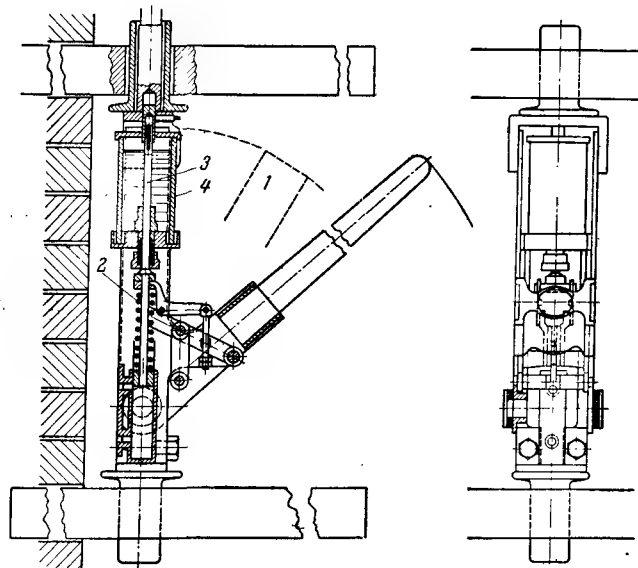


Рис. 13-32. Масляный выключатель Ферранти (3 кв). При отключении сначала выходит из сцепления ножевой рабочий контакт 1, затем освобождается пружина 2, быстро втягивающая дугогасящий контакт 3 в цилиндр 4, заполненный маслом.

В Америке аналогичного типа выключатели были построены в 1898 г. Хьюлеттом. Эти выключатели более, чем какие-либо другие, созданные до 1900 г., соответствовали нашим современным представлениям о масляных выключателях.

В ранних конструкциях масляных выключателей не предусматривалось никаких специальных гасительных устройств. Дуга в таких выключателях погасала тогда, когда расстояние между расходящимися контактами становилась достаточным для того, чтобы электрическая прочность деионизированного промежутка оказалась выше

восстанавливающегося напряжения. Выключатели с простым расхождением контактов в масле широко распространялись вплоть до 20-х годов текущего столетия.

Однако уже в 20-х годах было замечено, что с ростом отключаемых мощностей и напряжений быстро растут габариты масляных выключателей, увеличивается объем масла и осложняется процесс отключения. Время отключения у таких выключателей довольно велико (до 0,15 сек), и они способны разрывать лишь сравнительно малые токи короткого замыкания. Положение осложнялось еще тем, что в это время участились случаи взрывов масляных выключателей, сопровождаемых крупными пожарами. В настоящее время такие выключатели применяются лишь в установках небольшой мощности для напряжений до 10 кв.

Значительным улучшением конструкции масляных выключателей явилось введение дугогасительных камер, в которых создавалось газомасляное дутье сначала за счет энергии, развиваемой газимой дугой, а в более поздних конструкциях — за счет энергии от постороннего источника. Первый масляный выключатель с гасительной камерой (продольного дутья) был построен в 1908 г. американскими инженерами Хиллардом и Парсоном; рис. 13-33 позволяет уяснить себе принцип действия этого выключателя. Подвижные трубчатые контакты расцепляются с неподвижными контактами, установленными в верхних частях цилиндрических гасительных камер, и газы, образующиеся в камере при возникновении дуги, устремляются через трубчатый подвижный электрод, увлекая за собой дугу. Усовершенствованным вариантом рассмотренной камеры продольного дутья являлась конструкция, в которой подвижный электрод изготовлялся сплошным. В последнем случае давление в камере нарастало до того

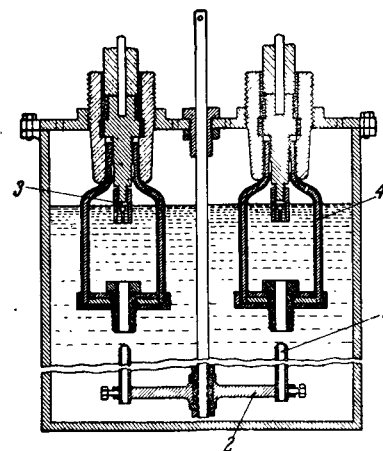


Рис. 13-33. Масляный выключатель с гасительной камерой.

1—подвижные контакты; 2—траверса; 3—неподвижные контакты; 4—цилиндрические гасительные камеры.

момента, пока подвижный электрод не выходил из горловины гасительной камеры; в указанный момент газомасляная смесь энергично вырывалась из камеры, быстро деионизируя дуговой промежуток.

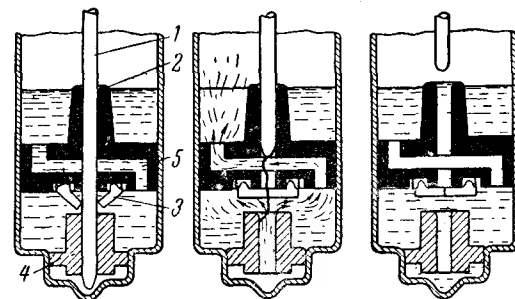
Интересно отметить, что применение дугогасительных камер в масляных выключателях началось только в 20-х годах текущего столетия, т. е. много лет спустя после их изобретения. Это обстоятельство объясняется ненадежной работой известных тогда дугогасительных устройств при малых отключаемых токах, когда выделяемая при горении дуги энергия была недостаточной для создания необходимого газомасляного дутья.

Расширить диапазон отключаемых токов удалось путем применения специальных устройств, позволяющих регулировать давление в дугогасительной камере продольного дутья. Например, советский инженер В. Г. Егоров в 1928 г. и американская фирма «Дженерал Электрик» в 1932 г. предложили разделять гасительную камеру на две части, соединенные промежуточным подпружиненным контактом. Дуга при отключении разделялась на две последовательно включенные части: гасимую дугу и гасящую. В одной из двух полукамер загоралась гасящая дуга, которая создавала давление газомасляной смеси, а в другой полукамере происходила деионизация гасимой дуги потоком газомасляной смеси, вырывавшейся из первой части камеры. В некоторых конструкциях подвижные промежуточные контакты механически связываются с поршнем. Благодаря этому удается регулировать длину гасящей дуги в зависимости от давления в полукамере, т. е. в зависимости от величины тока.

Большое распространение получили гасительные камеры с поперечным масляным дутьем, идея которых высказывалась еще в 20-х годах в патентах фирм «Дженерал Электрик», «Всеобщая компания электричества» (Германия) и советским инженером В. И. Ильченко. На рис. 13-34 показан принцип действия гасительной камеры фирмы ДЖИИ (1932 г.), применяющейся в маломасляных выключателях. При выходе подвижного контакта из розеточного неподвижного контакта между ними загорается гасящая дуга, которая продолжает гореть между неподвижным контактом и закрывшимися заслонками, повышая давление масла в нижнем отсеке камеры. Вторая часть дуги, гасимая, образуется между заслонками и продолжающим двигаться вверх подвижным контактом. Как только последний

открывает поперечный канал, газомасляная смесь из нижней части камеры устремляется в верхнюю, пересекая и деионизируя гасимую дугу.

Так же как и в выключателях с гашением дуги в воздухе, в масляных выключателях в 1930 г. стали применять гасительные камеры с узкой щелью. Для большей надежности отключения нередко использовали многократный разрыв цепи тока. Например, в 1935 г. фирма Вестингауз установила на гидростанции Боулдер-Дэм масляные выключатели с гасительной камерой с узкой щелью и 10-крат-



а) Включено б) Момент отключения в) Отключено

Рис. 13-34. Гасительная камера поперечного дутья.

1 — подвижный контакт; 2 — горловина, выполненная из изоляционного материала; 3 — заслонки; 4 — неподвижный контакт; 5 — поперечный канал.

ным разрывом цепи тока. Эти выключатели были рассчитаны на напряжение 287 кВ и отключаемую мощность 2500 МВА.

Особую группу масляных выключателей составили выключатели с расширительной гасительной камерой (экспансионный выключатель). В этих выключателях при достижении определенной величины давления внутри камеры отдельные звенья, из которых состоит гасительная камера, раздвигаются, и ионизированные газы вырываются сквозь образовавшиеся щели.

Оказалось, что в такой камере создаются условия, весьма благоприятные для быстрого гашения дуги. Расширительная камера была изобретена в 1929 г. Ф. Кессельрингом (Германия) и получила в Европе довольно широкое распространение. На рис. 13-35 показан внешний вид современного сдвоенного расширительного масляного выключателя на 400 кВ, 12 000 МВА.

Довольно широкое распространение, особенно в Америке, получили, начиная с 30-х годов, импульсные выключатели, в которых гашение дуги осуществляется за счет энергии, получаемой от постороннего источника, как правило за счет энергии привода выключателя. Обычно механизм привода связывается с поршнем, который создает

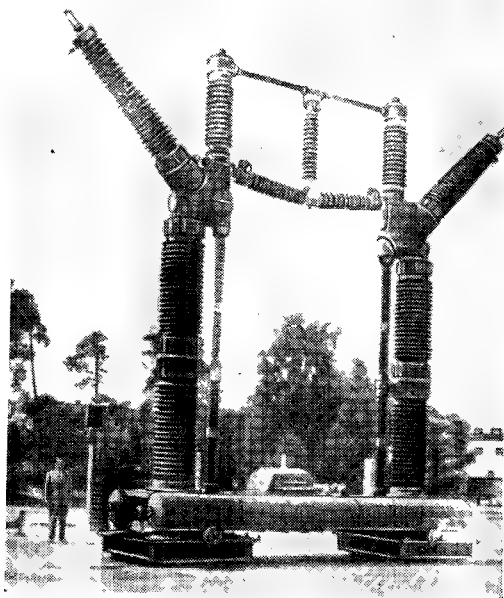


Рис. 13-35. Расширительный выключатель с масляным отъединителем 400 кв, 12 000 Мва.

энергичное движение струи масла в область дуги. Дугогасительный эффект при этом бывает столь велик, что дуга погасает при первом же прохождении тока через нулевое значение, а при малых токах разрыв цепи может произойти и ранее этого момента. В последнем случае возникают опасные перенапряжения в электрической установке, что является существенным недостатком импульсного выключателя. Импульсные выключатели изготавливаются как малообъемными, так и с большим объемом масла.

Принцип импульсного масляного выключателя был известен с конца 90-х годов прошлого столетия. В 1898 г. американская фирма «Клооса» построила выключатели для тока до 300 а и напряжения до 2,5 кв. Схема этого выключателя приведена на рис. 13-36.

В течение следующих примерно 10 лет разными фирмами Европы и Америки были созданы различные конструкции импульсных выключателей. Однако выключатели на большие отключаемые мощности и высокие напряжения стали строиться только в 30-х годах текущего столетия. Так, американская фирма ДЖИИ в 1935 г. изготовила импульсный малообъемный выключатель на 287 кв, 2 500 Мва с восемью разрывами цепи тока на каждую фазу и с давлением масла до 10 ат. Это давление создается поршнем, связанным с приводным механизмом.

Конструктивное оформление малообъемных импульсных масляных выключателей оказалось неудачным: привод выключателя создавал большую ударную нагрузку на фарфоровые изоляторы и расшатывал крепления. Поэтому фирма ДЖИИ прекратила выпуск этих выключателей и перешла на изготовление баковых импульсных выключателей. В 1955 г. был изготовлен импульсный баковый выключатель с максимальной мощностью отключения 25 000 Мва.

Малообъемные взрывобезопасные выключатели, получившие очень широкое распространение, требуют, однако, более высокого качества обработки деталей, технология их производства сложна, и поэтому они дороги. До настоящего времени многие специалисты, особенно в Америке, предпочитают устанавливать баковые выключатели, отличающиеся сравнительно небольшим весом, простотой и большей надежностью.

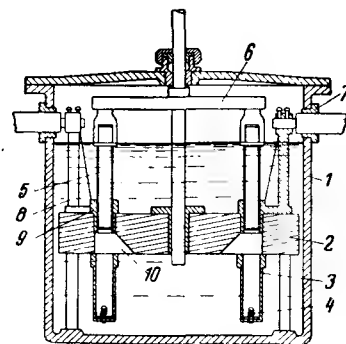


Рис. 13-36. Импульсный масляный выключатель Клооса (1898 г.).

При отключении подвижные контакты 5, выполненные в виде поршня, выходят из неподвижных контактов 3, выполненных в виде цилиндров. В цилиндрах 3 создается разрежение, и как только открывается отверстие 10, масло через него устремляется в цилиндры, способствуя гашению возникшей между контактами дуги. При включении масло из цилиндров удаляется через обратные клапаны 4.

Водяные выключатели

Многочисленные случаи взрывов масляных выключателей старых конструкций (второе десятилетие текущего столетия) заставили ученых и инженеров изыскивать возможности создания более надежных безмасляных выключателей. Естественным было стремление заменить масло другой дугогасительной средой, в частности водой. Принципиальная схема действия водяного выключателя не отличалась от схемы масляного выключателя. Например, первый водяной выключатель, предложенный в 1900 г. в Англии Рубортом, был устроен следующим образом: при отключении подвижной контакт проходит через слой воды, которая под действием температуры дуги испаряется; пары устремляются через открывающееся отверстие в расширительную камеру и способствуют деионизации дугового промежутка.

Водяные выключатели были безопасными в пожарном отношении, но не получили достаточно широкого распространения в силу присущих им недостатков: вода быстро испаряется, зимой может замерзнуть, вызывает коррозию контактов.

Трубчатые и автогазовые выключатели

С 1893 г. и до первых лет текущего столетия получили некоторое применение трубчатые выключатели, явившиеся предшественниками современных выключателей с газовым и воздушным дутьем. В первых трубчатых выключателях движение воздуха создавалось за счет образования вакуума внутри трубки при выходе из нее подвижного контакта. Затем в таких трубках стали делать газогенерирующие обкладки. Под термическим действием дуги эти обкладки выделяют газ, который способствует гашению дуги.

Однако такие выключатели работали ненадежно: при малых токах газовыделение было недостаточно интенсивным, а при больших токах трубки разрывались.

Мысль о применении газогенерирующих обкладок была реализована в 30-х и 40-х годах текущего столетия в конструкциях автогазовых выключателей. В качестве газогенерирующих обкладок обычно используются сменные вкладыши из органического стекла или фибры. Образующиеся газы под давлением направляются в зону гашения дуги. Автогазовые выключатели обычно строятся для на-

пряжений до 10, редко до 20 кВ и часто используются как выключатели нагрузки¹.

Воздушные выключатели

В последние 30 лет очень широкое распространение в установках высокого напряжения получили выключатели с гашением дуги сжатым воздухом. Часто для простоты их называют воздушными выключателями.

Как и все другие описанные выше типы, выключатель с гашением дуги сжатым воздухом был изобретен в 90-х годах прошлого столетия. В 1897 и 1900 гг. немецкие фирмы АЕГ и «Гелиос» осуществляли гашение дуги в рычажных выключателях струей сжатого воздуха, подводимого в зону горения дуги по резиновым трубкам. Позднее было предпринято несколько попыток построить воздушные выключатели, в которых воздух сжимался поршнем, связанным с приводным механизмом, выключатели с выдуванием дуги на рога, с деионными решетками и т. п. Но первые 30 лет своего существования воздушные выключатели не могли сколько-нибудь успешно конкурировать с масляными выключателями, главным образом из-за недостаточной изученности процессов гашения дуги сжатым воздухом.

Особое внимание было обращено на воздушные выключатели лишь в конце 20-х годов, когда построение надежных, быстродействующих, взрывобезопасных выключателей на напряжения 220 кВ и выше стало неотложной задачей. Исследования, выполненные в 1925—1926 гг. немецким инженером Руппелем, показали, что условия для гашения дуги улучшаются с увеличением скорости истечения струи воздуха. Указанный эффект можно получить при помощи расширяющегося сопла. Исследования Руппеля привлекли к себе внимание многих инженеров и ученых, и уже с 1929—1930 гг. в разных странах стали создаваться удачные конструкции воздушных выключателей.

В качестве примера одной из первых удачных конструкций воздушного выключателя можно привести построенный в 1929 г. выключатель фирмы АЕГ, схема которого приведена на рис. 13-37. Этот выключатель при напряжениях до 15 кВ и давлении воздуха до 15 ат показал отключаемую мощность до 270 МВА.

¹ Выключателями нагрузки называют такие выключатели, которые используются только для отключения токов нагрузки. Для отключения токов короткого замыкания обычно последовательно с выключателями нагрузки включают кварцевые предохранители высокого напряжения.

В дальнейшем стали изготавливать воздушные выключатели с несколькими разрывами цепи тока, с большим разнообразием систем привода, с давлениями воздуха в баке до 20 ат и более, выключатели без внешних отделителей и с внешними отделителями и др.

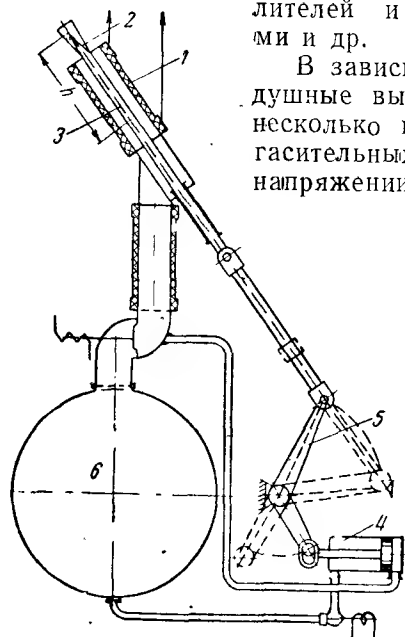


Рис. 13-37. Выключатель с гашением дуги сжатым воздухом (1929 г.). Под действием пневматического привода 4 и рычагов 5 подвижный контакт 3 отрывается от неподвижного контакта 2, выполненного в виде расширяющегося сопла. Одновременно в гасительную камеру 1 подается сжатый воздух из бака 6.

В зависимости от напряжения воздушные выключатели имеют одну или несколько последовательно включенных гасительных камер. Так, например, при напряжении 35 кВ достаточно одной гасительной камеры, а при 400 кВ их уже требуется семь-восемь.

Воздушные выключатели благодаря своим достоинствам (быстродействие, надежность работы, сравнительно небольшие габариты) стали вытеснять масляные выключатели в крупных энергетических системах с напряжениями 220 кВ и выше. Лишь изобретение импульсных баковых масляных выключателей, оказавшихся более простыми и дешевыми, заставило ведущие американские фирмы в результате многочисленных экспериментов и дискуссий склониться в сторону изготовления баковых импульсных масляных выключателей.

К изложенной выше краткой истории выключателей высокого напряжения следует добавить еще то, что в некоторых типах выключателей с конца 90-х годов стали устраивать так называемые строенные сопротивления. Назначения этих сопротивлений были разнообразными, в частности снижение восстанавливающегося напряжения, равномерное распределение напряжения по разрывам цепи тока в выключателях, имеющих несколько разрывов на фазу.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Классики марксизма-ленинизма

- К. Маркс, Капитал, т. 1, Госполитиздат, 1952.
К. Маркс, К критике политической экономии, Госполитиздат, 1949.
Ф. Энгельс, Происхождение семьи, частной собственности и государства, Госполитиздат, 1949.
Ф. Энгельс, Диалектика природы, Госполитиздат, 1948.
Ф. Энгельс, Анти-Дюринг, Госполитиздат, 1948.
Ф. Энгельс, Анти-Дюринг, Госполитиздат, 1948.
К. Маркс и Ф. Энгельс, Манифест коммунистической партии, Госполитиздат, 1949.
В. И. Ленин, Развитие капитализма в России, Соч., т. 3.
В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритицизм, Соч., т. 14.
В. И. Ленин, Империализм, как высшая стадия капитализма, Соч., т. 22.
В. И. Ленин, Цивилизованное варварство, Соч., т. 19.

Важнейшие труды деятелей науки и техники

- А. Ампер, Электродинамика, Изд. АН СССР, 1954.
М. О. Доливо-Добровольский, Избранные труды (о трехфазном токе), Госэнергоиздат, 1948.
С. Карно, Размышление о движущей природе огня, Сборник «Второе начало термодинамики», Гостехиздат, 1934.
Э. Х. Ленц, Избранные труды, Изд. АН СССР, 1950.
М. В. Ломоносов, Избранные философские произведения, Госполитиздат, 1950.
Р. Майер, Закон сохранения и превращения энергии, Гостехиздат, 1933.
В. В. Петров, Известие о гальвани-вольтовых опытах, Гостехиздат, 1936.
М. Фарадей, Экспериментальные исследования по электричеству, т. 1, Изд. АН СССР, 1947.

Общая литература по истории науки и техники

- Л. Д. Белькинд, П. Н. Яблочков, Госэнергоиздат, 1950.
М. Д. Бочарова, Электротехнические работы Б. С. Яблочки, Госэнергоиздат, 1959.
О. Н. Веселовский, М. О. Доливо-Добровольский, Госэнергоиздат, 1958.
С. А. Гусев, Очерки по истории развития электрических машин, Госэнергоиздат, 1953.
С. А. Гусев, Очерки по истории развития выключателей переменного тока, Госэнергоиздат, 1958.
М. О. Каменецкий, Первые русские электростанции, Госэнергоиздат, 1951.
В. С. Квятковский и П. Н. Ковалев, Гидротурбиностроение, Госэнергоиздат, 1958.
И. Я. Конфедератов, И. И. Ползунов, Госэнергоиздат, 1951.
И. Я. Конфедератов, История теплоэнергетики, Госэнергоиздат, 1954.
П. С. Кудрявцев, История физики, т. 1 и 2, Учпедгиз, 1956.
Б. В. Кузнецов, Развитие тепловых двигателей, Госэнергоиздат, 1953.
В. Г. Кузнецов, История энергетической техники, Гостехиздат, 1937.
С. С. Кутателадзе и Р. Б. Цукерман, Очерки развития теории тепла в работах русских ученых XVIII и XIX вв., Госэнергоиздат, 1949.
С. С. Кутателадзе и Р. Б. Цукерман, Работы русских ученых в области котельной техники, Госэнергоиздат, 1951.
Г. А. Матвеев, История отечественного котлостроения, Машгиз, 1951.
А. А. Радциг, История теплотехники, Изд. АН СССР, 1945.
М. А. Шателен, Русские электротехники XIX в., Госэнергоиздат, 1955.
План электрификации РСФСР, Доклад VIII съезду Советов, Госполитиздат, 1955.
К истории плана электрификации Советской страны, Сборник документов и материалов 1918—1920 гг., Госполитиздат, 1952.
Развитие электрификации Советской страны 1921—1925 гг., Госполитиздат, 1956.
История энергетической техники СССР, т. 1 и 2, Госэнергоиздат, 1957.
Динамомашин в ее историческом развитии, Документы и материалы, под ред. В. М. Миткевича, Изд. АН СССР, 1934.
Электродвигатель в его историческом развитии, Документы и материалы, под ред. В. Ф. Миткевича, Изд. АН СССР, 1936.
Павел Николаевич Яблочков, Труды, документы, материалы, Сост. Л. Д. Белькинд, Изд. АН СССР, 1954.
Сборник «50 лет радио», вып. 1 и 2, Изд. АН СССР, 1945.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Авогадро, Амедео (Avogadro, 1776—1856) 194, 195
 Агрикола, Георгий (Agricola, 1490—1555) 106
 Адамс (Adams) 480
 Александров, Иван Гаврилович (1875—1936) 507, 515
 Альбан, Эрнст (Alban, 1791—1846) 163, 164
 Алымов, Илья Павлович (1831—1884) 376, 377
 Амонтон, Гильом (Amonton, 1663—1705) 137
 Ампер, Андре Мари (Ampère, 1775—1836) 220, 221, 245, 260, 270, 310
 Араго, Франсуа Доминик (Arago, 1786—1853) 121, 194, 216, 220, 224, 413, 414
 Аркрайт, Ричард (Arkwright, 1732—1792) 145, 146
 Арманго, Жак Эжен (Armengaud, 1810—1891) 410
 Армстронг, Уильям Джордж (Armstrong, 1810—1900) 314
 Арнольд, Энгельберт (Arnold, 1856—1911) 256
 Артемьев Д. И. 373, 375
 Архимед (ок. 287—212 до н. э.) 53, 86, 111
 Аршаулов В. П. 405
 Аршро, Анри Жозеф (Archereau, 1819—1893) 247

Б

Барзинти Э. (Barsanti, 1821—1864) 189
 Баркер (Barker) 247

Барлоу, Питер (Barlow, 1776—1862) 163, 227—228
 Бейли, Уолтер (Bailey) 413, 414
 Беккерель, Антуан Сезар (Becquerel, 1788—1878) 219, 242, 479
 Белидор, Бернар Форé (Béjidor, 1697—1761) 284
 Бенардос, Николай Николаевич (1842—1905) 456, 457, 549
 Бен-Эшенбург (Ben-Eschenburg) 439
 Береснев В. И. 372
 Бернулли, Даниил (Bernoulli, 1700—1782) 135, 276, 277
 Бернштейн, Эдуард (Bernstein, 1850—1932) 485
 Бертолле, Клод Луи (Berthollet, 1748—1822) 146
 Берцеллиус, Йенс Якоб (Berzélius, 1779—1848) 479
 Бетанкур, Августин Августинович (1758—1824) 194
 Биот, Жан Батист (Biot, 1774—1862) 220, 310
 Блати, Отто Титус (Blaty, 1860—1938) 331, 332, 334
 Блек, Джозеф (Black, 1728—1799) 138, 194
 Блинов, Федор Абрамович (1827—1902) 406
 Бо-де-Роша (Beau-de-Rochas) 189
 Бойль, Роберт (Boyle, 1627—1691) 138, 195
 Болтон, Меттью (Bolton, 1723—1809) 148, 153, 170, 402
 Бон-Бруевич, Михаил Александрович (1888—1940) 476
 Боргман, Иван Иванович (1849—1915) 444
 Брагин, Сергей Михайлович 590

Бранка, Джованни (Branca, 1571—1645) 49, 50, 133
 Бранли, Эдуард (Branly, 1844—1935) 465, 466
 Бредли, Чарльз (Bradley) 419
 Бреш, Чарльз Френсис (Brush, 1849—1923) 343
 Броун, Чарльз Юджин Ленслот (Brown, 1863—1924) 430, 441, 603
 Бурбюз (Bourbouze) 238, 239
 Бутаков, Иннокентий Николаевич 411
 Бушеро 624
 Быков Н. А. 404, 411, 412
 Бэкон, Френсис (Bacon, 1566—1629) 138
 Бюрден, Клод (Burdin, 1790—1873) 284

В

Ван-Депуль (van de Pool) 451
 Варбург, Эмиль (Warburg, 1846—1933) 257, 437
 Варли, Кромвель Флитвуд (Varley, 1828—1883) 252
 Варли, Семьюэль Олфред (Varley) 252
 Вэбер, Вильгельм Эдуард (Weber, 1804—1891) 256
 Вейсбах, Юлиус Людвиг (Weissbach, 1806—1871) 297
 Витрувий (Vitruvius Pollio, I в. до н. э.) 84
 Войнаровский, Павел Дмитриевич (1866—1913) 549
 Вологдин, Вячеслав Петрович (1881—1953) 472
 Вольта, Алессандро (Volta, 1745—1827) 204, 215
 Вульф, Артур (Woolf, 1766—1837) 170
 Вустер, Эдвард (Worcester, XVII в.) 130, 133
 Вышнеградский, Иван Алексеевич (1831—1895) 157, 196, 372, 385 411

Г

Гавриленко, Александр Павлович (1861—1914) 376
 Гадолин, Аксель Вильгельмович (1828—1892) 196
 Галилей, Галилео (Galilei, 1564—1642) 135, 137

Галльвакс, Вильгельм (Hallwachs 1853—1922) 478
 Гальвани, Луиджи (Galvani, 1737—1793) 45, 215
 Гёбель, Генрих (Goebel, 1818—1833) 304
 Гейгер, Ганс (Geiger, 1882—1945) 479
 Гей-Люссак, Жозеф (Gay-Lussac, 1778—1850) 194, 195
 Гельмгольц, Герман Людвиг (Helmholtz, 1821—1894) 198, 205, 208, 461
 Генри, Джозеф (Henry, 1791—1878) 222, 223, 460, 461, 636
 Геншель, Карл Антон (Henschel, 1780—1861) 283—292
 Герикс, Стго фон (Guericke, 1602—1636) 110, 111, 137, 212
 Герон Александрийский (I в. до н. э.) 87, 386, 388
 Герц, Генрих (Hertz, 1857—1894) 312, 460, 463, 464, 471, 477
 Гёфнер-Альтенек, Фридрих (Hefner-Alteneck, 1845—1904) 255
 Гиббс, Эдуард Диксон (Gibbs) 323, 330, 334, 356
 Гильберт, Уильям (Gilbert, 1554—1603) 211
 Гиппарх (ок. 185—125 до н. э.) 90
 Гирн, Густав Адольф (Hirn, 1815—1890) 172, 195, 382, 411
 Глазунов, Александр Александрович (1891—1960) 594
 Гольцварт (Holzwart) 410
 Голяр, Люсьен (Golard, 1850—1888) 329, 330, 335, 356
 Гопкинсон, Джон (Hopkinson, 1849—1898) 257, 258, 331, 332, 352
 Гопкинсон, Эдуард (Hopkinson) 331, 332
 Гордон, Джон (Gordon, 1852—1893) 327
 Горев, Александр Александрович (1884—1953) 507, 588
 Грамм, Зеноб Теофил (Gramme, 1826—1901) 241, 252—255, 305, 315, 316, 322, 327, 422, 449, 450
 Графтио, Генрих Осипович (1869—1949) 507, 515
 Гребер (Greber) 525
 Гречанинов А. В. 411
 Гриневецкий, Василий Игнатьевич (1871—1919) 377, 411

Грюблер (Grübler) 390
Гудьир, Чарльс (Goodyear, 1800—1860) 309
Гулишамбаров С. 372
Гуйгенс, Христиан (Huyghens, 1629—1695) 115, 130, 138

Д

Даймлер, Готлиб (Daimler, 1834—1900) 398
Даламбер, Жан Лерон (d'Alembert, 1717—1783) 135
Дальтон, Джон (Dalton, 1767—1844) 194
Данилин С. 372
Девенпорт, Томас (Davenport, 1802—1851) 233, 234
Декарт, Рене (Descartes, 1596—1650) 135, 200, 207
Делиль, Карл (Delisle, 1827—1909) 137
Делоншан (Delongchamp) 386
Демокрит (ок. 460—370 до н. э.) 200
Демьянов М. Н. 377
Депп, Георгий Федорович (1854—1921) 372, 377, 390, 404, 411
Депре, Марсель (Deprez, 1843—1918) 41, 317—320, 338, 568
Дери, Макс (Dery, 1854—1934) 331, 332, 334
Джбуль, Джеймс Прескотт (Joule, 1818—1889) 205, 207, 208, 219, 315
Дивин, Прокоп (Diviš, 1698—1765) 214
Дизель, Рудольф (Diesel, 1858—1913) 383, 398—403, 408
Добротворский, Веннамин Федорович 549
Долголенко, Владимир Яковлевич (1868—1919) 363, 367, 368
Доливо-Добровольский, Михаил Осипович (1862—1919), 41, 338, 353, 421—433, 437—439, 444, 446, 447, 582—584, 587, 603, 624, 637, 640
Дольбир (Dolbear) 462
Дубелир, Григорий Дмитриевич (1874—1942) 507
Дубс (Dubs) 295
Дэви, Хемфри (Davy, 1778—1829) 201, 217, 218, 221
Дюлонг, Пьер Луи (Dulong, 1785—1838) 194

Ж

Жданов, Петр Сергеевич (1903—1949) 588
Жирар (Girard) 42, 291, 387
Жобар (Jobart) 304
Жонваль, Н. Ж. (Jonval) 42, 289—292
Жуковский, Николай Егорович (1847—1921) 300

З

Залесов, Поликарп Михайлович 133, 180
Зеебек, Томас Иоганн (Seebeck, 1770—1831) 204, 219
Земмеринг, Самуил Томас (Sommering, 1755—1830) 259
Зинстеден, Вильгельм Иозеф (Zin-steden, 1803—1891) 242, 250, 257

И

Иедлик А. 251, 252
Ишервуд 195, 411

К

Калашников, Василий Иванович (1849—1908) 373
Каплан, Виктор (Kaplan, 1876—1934) 296—298
Капп, Гизберт (Капп, 1852—1922) 437, 439, 586
Караводин В. В. 410
Кардан, Джеронио (Cardano, 1501—1576) 111
Карлейль, Антони (Carliste, 1768—1840) 217
Карно, Николай Сади (Carnot, 1796—1832) 197, 198, 205, 398
Карташев В. 411
Картрайт, Эдмунд (Cartwright, 1743—1823) 146, 150, 151
Кей, Джон (Keu, 1704—1764) 144
Кеплер, Иоганн (Kepler, 1571—1630) 135
Кертис, Чарльз Гленн (Curtis, 1860—1953) 394, 395
Киров, Сергей Миронович (1886—1934) 511
Кирпичев, Михаил Викторович (1879—1955) 524, 533
Кирхгофф, Густав Роберт (Kirchhoff, 1824—1887) 222

Кириш, Карл Васильевич (1877—1919) 378
Клапейрон, Бенуа Поль Эмиль (Clapeyron, 1799—1864) 195
Классон, Роберт Эдуардович (1868—1926) 444, 545, 561
Клаузиус, Роберт (Clausius, 1822—1883) 195, 198
де Ко, Соломон (de Saus, 1576—1626) 112
Коган, Александр Григорьевич 507
Константинов, Константин Иванович (1819—1871) 264, 265
Коперник, Николай (Copernicus, 1473—1543) 135
Корейво, Ромульд Антонович (1852—1920) 405
Корлисс (Corliss, 1817—1888) 170, 171
Котурницкий П. В. 411
Кбули (Cowley) 49, 116, 119, 123, 130, 138
Кржижановский, Глеб Максимилианович (1871—1959) 483, 507, 508
Кромптон, Семьюэль (Crompton, 1753—1827) 146
Круг, Карл Адольфович (1873—1952) 439, 507
Крузенштерн, Иван Федорович (1770—1846) 235
Крукс, Уильям (Crookes, 1832—1919) 466
Кубецкий Л. А. 479
Кузьминский, Павел Дмитриевич (1840—1900) 373, 374, 409
Кулон, Шарль Огюст (Coulomb, 1736—1806) 212, 213, 221, 310
Кюньо, Жозеф Никола (Cugnot, 1725—1804) 119, 120, 182—184

Л

Лаваль, Густав Патрик (Laval, 1846—1913) 42, 388—391, 408
Лагранж, Жозеф Луи (Lagrange, 1736—1813) 135
Ламонт (Lamonte) 529
Ланген, Евгений (Langen, 1833—1893) 189, 190
Лаплас, Пьер Симон (Laplace, 1749—1827) 220, 310
Лапшин, Василий Иванович (1809—1888) 247
Лаулин М. 180

Лачинов, Дмитрий Александрович (1842—1902) 317, 318, 338
Лебедев, Петр Николаевич (1866—1911) 312
Лебедев, Сергей Алексеевич 588
Лейбниц, Готфрид Вильгельм (Leibnitz, 1646—1716) 115, 136
Лейхтенбергский, Максимилиан Евгеньевич (1817—1852) 269
Лелявский, Николай Семенович (1853—1905) 549
Ленард, Филипп (Lenard) 479
Ленин, Владимир Ильич (1870—1924) 12, 25, 32, 55, 89, 142, 199, 484—487, 506—508, 519, 520
Ленуар, Жан Жозеф Этьен (Lepoigt, 1822—1900) 188, 189, 407
Ленц О. К. 372
Ленц, Эмилий Христианович (1801—1865) 204, 205, 219, 225, 226, 235, 246, 256, 272, 273, 315, 436
Леонардо-да-Винчи (da Vinci, 1452—1519) 101—103, 111, 200
Леупольд, Якоб (Leupold, 1674—1727) 153, 156
Либкнехт, Вильгельм (Liebknecht, 1826—1900) 486
Литвинов, Степан Васильевич (1785—1843) 165, 166, 180
Лодж, Оливер (Lodge, 1851—1940) 465, 466
Лодыгин, Александр Николаевич (1847—1923) 307, 308, 452
Ломоносов, Михаил Васильевич (1711—1765) 137, 139, 198, 200, 214
Лоренц, Генрик Аитон (Lorentz, 1853—1928) 298

М

Майер, Роберт Юлиус (Mayer, 1814—1873) 205—209
Макарьев, Тихон Федорович (1870—1945) 533
Маковский, Владимир Матвеевич (1870—1941) 542
Максвелл, Джеймс Кларк (Maxwell, 1831—1879) 257, 273, 310—312, 436, 463
Максим, Хайрам (Maxim, 1840—1916) 256
Мариотт, Эдм (Mariotte, 1620—1684) 195

Маркони, Гуильельмо (Marconi, 1874—1937) 469, 470

Маркс, Карл (1818—1883) 5, 7, 44, 46, 49, 54, 60, 61, 64, 69, 98, 103, 110, 113, 135, 152, 153, 159, 184, 319, 482, 483, 485, 507, 551

Маттеуши (Matteucci) 189

Мейснер, Александр (Meisner) 475

Миллер, Оскар фон (Miller, 1855—1934) 430

Милликен, Роберт Эндрюс (Millikan, 1868—1953) 479

Миткевич, Владимир Федорович (1872—1951) 586

Модслей, Генри (Modslav, 1771—1831) 103

Мордей, Вильям Моррис (Mordey, 1856—1938) 325—327

Морен, Артур (Morin, 1795—1880) 285

Морзе, Семьюэль Финлей Бриз (Morse, 1791—1872) 261, 468

Н

Нартов, Андрей Константинович (1680—1756) 103

Нератов А. 297

Нервандер, Иоганн (Nervander, 1805—1843) 271

Несмит, Джеймс (Nasmyth, 1760—1835) 164, 177, 178

Никольсон, Уильям (Nickolson, 1753—1815) 217

Нобель, Людвиг Эммануил (1831—1886) 191, 401, 405

Нобили, Леопольдо (Nobili, 1784—1835) 270

Ноллэ (Nollet) 248

Нуссельт В. (Nusselt) 525

Ньюкомбен, Томас (Newcomen, 1662—1729) 49, 116, 119, 123, 130, 138, 154—156, 162, 170, 402, 546

Ньютон, Исаак (Newton, 1643—1729) 135, 137

О

Оливен О. 493

Ом, Георг Симон (Ohm, 1784—1954) 221, 222

Отто, Николай Август (Otto, 1832—1891) 189, 190

П

Папалекси, Николай Дмитриевич (1880—1947) 476

Патен, Дейи (Papin, 1647—1712) 115, 130, 131, 133, 189, 402

Парк 588

Парсонс, Чарльз Альджернон (Parsons, 1854—1931) 42, 391, 392, 395, 402, 408, 610

Паскаль, Блез (Pascal, 1623—1662) 135

Пачинотти, Антонио (Pacinotti, 1841—1912) 240, 241, 252

Пашинин Н. 373, 374

Пейдж, Чарльз Грефтон (Page, 1812—1868) 238

Пельтон А. Л. (Pelton, 1829—1908) 293—295

Пельтье, Жан Шарль Атанас (Peltier, 1785—1845) 204, 219

Пермяков А. И. 291

Перриго (Perrigot) 387

Петров, Василий Владимирович (1761—1834) 201, 216—219, 221

Петров, Николай Павлович (1836—1920) 376, 377

Петр Первый (1672—1725) 136

Петрушевский, Федор Фомин (1828—1904) 196

Пиксии (Pixii) 244, 245

Пироцкий, Федор Апполонович (1845—1898) 316, 317, 450, 451

Планте, Гастон Раймон (Planté, 1834—1889) 212

Поггендорф, Иоганн Христиан (Poggendorf, 1796—1877) 272

Поинтинг, Джон Генри (Pointing, 1852—1914) 312

Ползунов, Иван Иванович (1729—1766) 118, 126—130, 138, 157, 162, 180, 546

Понселе, Жан Виктор (Poncelet, 1788—1867) 280

Попов, Александр Степанович (1859—1905) 459, 465—472

Порта, Джамбаттиста делла— (della Porta, 1545—1615) 112

Поульсен, Вальдемар (Poulsen, 1869—1942) 472

Празиль Ф. (Prazil) 298

Прандтль, Людвиг (Prandtl, 1875—1953) 525

Предтеченский А. И. 377

Прис, Уильям (Preece, 1834—1913) 470

Прони, Мари Риш (Prony, 1755—1839) 194

Пти, Алексис Терез (Petit, 1791—1820) 194

Птолемей, Клавдий (Ptolemaeus, II в.) 90

Пфарт, Георг Адольф (Pfarr, 1851—1912) 298

Р

Радциг, Александр Александрович (1869—1941) 391, 402, 412

Рамзин, Леонид Константинович (1887—1948) 507, 529, 534, 538

Ратэ, Камилл Эдмон Огюст (Rataeu, 1863—1930, 393, 506

Редтенбахер, Фердинанд (Redtenbacher, 1809—1863) 297

Рейсс, Федор Федорович (1778—1852) 218

Рэнкин, Уильям Джон (Rankin, 1826—1872) 388

Реньо, Анри Виктор (Regnault, 1810—1878) 195

Реомюр, Рене Антуан Фершб (Réaumur, 1683—1757) 137

Рерих К. Э. 411

Рессель, Иозеф Людвиг Франц (Ressel, 1793—1857) 379

Риги, Агостино (Righi) 470

Рихман, Герт Вильгельм (1711—1753) 137, 212—214

Риччи, Уильям (Ritchie, 1790—1837) 228

Робертсон 588

Рожков, Василий Иванович (1816—1894) 291

Романьози, Джованни Доменико (Romagnosi, 1761—1835) 220

Румкорф, Генрих Даниэль (Ruhmkorff, 1803—1877) 328

Румфорд, Бенджамин (Rumford, 1753—1814) 201

Рыбкин Петр Николаевич (1864—1948) 468, 469, 471

С

Савар, Феликс (Savart, 1791—1841) 220, 310

Савельев, Александр Степанович (1820—1860) 247

Сафонов, Игнатий Егорович (1806—1850) 286

Суйнберн Д. 332

Свон, Джон Уильсон (Swan, 1823—1914) 304, 353

Севери (Savery, 1650—1715) 113, 114, 116, 130, 133, 402, 407, 530

Сегнер, Янош Андраш (Szegner, 1704—1777) 277, 278

Сен-Венан, Адемар Жан Клод Барре (Saint-Venant, 1797—1896) 386

Сидоров, Анатолий Иванович (1866—1931) 411

Сименс, Вернер (Siemens, 1816—1892) 250, 273, 316, 323, 324, 450, 451, 453, 458, 479

Славянов, Николай Гаврилович (1854—1897) 457

Смирнов Н. В. 358

Смитон, Джон (Smeaton, 1724—1794) 43, 163, 178, 179

Спрэг (Sprague) 452

Стевин, Симон (Stevin, 1548—1620) 135

Стерджен, Уильям (Sturgeon, 1783—1850) 271

Стефенсон, Джордж (Stephenson, 1781—1848) 52, 184, 185, 402

Стодола, Аверел (Stodola, 1859—1942) 390, 412

Столетов, Александр Григорьевич (1839—1896) 257, 478

Сушкин, Николай Иванович 594

Т

Табулевич В. В. 375, 376

Теннант, Смитсон (Tennant, 1761—1815) 146

Тесла, Никола (Tesla, 1856—1943) 414, 417, 419, 420, 423, 425, 465, 172

Тиме, Иван Августович (1838—1920) 291, 411

Тимонов, Всеволод Евгеньевич (1862—1936) 549

Тимофеев, Петр Васильевич 479

Тиссандье, Альфред (Tissandier), 452

Тиссандье, Гастон (Tissandier, 1843—1899) 452

Томсон (Кельвин), Уильям (Thomson, 1824—1907) 198, 209, 273, 325

Томсон, Илайю (Thomson, 1853—1937) 150, 334, 335, 456, 471
Торричелли, Эванджелюста (Torricelli, 1608—1647) 110
Тревитик, Ричард (Trevithick, 1771—1833) 43, 182—184
Тредгольд 194
Тринклер, Густав Васильевич (1876—1954) 405
Тронцкий Д. Н. 468
Трувё, Гюстав (Trouvé, 1839—1902) 452
Турнер 386, 387
Тюри, Р. (Thury) 568, 581

У

Уайльд, Генри (Wilde) 250, 251, 321, 323
Уатт, Джеймс (Watt, 1736—1819) 43, 46, 148, 153—157, 170, 173, 181, 183, 194, 402, 546
Угрюмов, Александр Иванович 507
Угрюмов, Борис Иванович 507
Уитстон, Чарльз (Whitstone, 1802—1875) 252, 273, 333
Ульянин, Владимир Александрович (1863—1931) 480
Умов, Николай Алексеевич (1846—1915) 312
Усагин, Иван Филиппович (1855—1919) 329

Ф

Фарадэй, Михаил (Faraday, 1791—1867) 204, 218, 222—225, 227, 228, 243, 244, 271, 311, 328
Фарко 385, 387
Фаренгейт, Даниэль Габриэль (Fahrenheit, 1686—1736) 137
Флёминг, Джон Амброус (Fleming, 1849—1945) 474
Феппл, Август (Föppl, 1854—1924) 330
Ферранти, Себастьян Цианиде (Ferranti, 1850—1930) 324, 325, 331, 356, 357
Феррарис, Галилео (Ferraris, 1847—1897) 414—416, 420, 421, 438
Фёссенден, Реджинальд Обри (Fessenden, 1866—1932) 472
Филиппов Д. Д. 405, 411
Финк, Карл (Fink, 1821—1888) 292

Фонтен, Ипполит (Fontaine) 315, 319, 580
Фбрест, Ли де (Forest) 474
Франклин, Бенджамин (Franklin, 1706—1790) 214
Френсис, Джеймс Бичано (Francis, 1815—1892) 292
Фролов, Кузьма Дмитриевич (1726—1800) 106, 108
Фроман, Поль Гюстав (Froment, 1815—1865) 237, 238
Фуко, Жан Бернар Леон (Foucault, 1819—1868) 303
Фурнейрон, Бенуа (Fournayron, 1802—1867) 284—286

Х

Хазельвандер, Фридрих Август (Haselwander, 1859—1932) 419, 420
Харгривс, Джеймс (Hargreaves, 1720—1778) 144
Хелл, Джонатан (Hull) 119
Хиорт, Серен (Hjort, 1801—1870) 251, 252
Холмс, Фредерик Хейль (Holmes) 248
Хорнблээр, Джонатаи (Hornblower, 1735—1815) 170
Хотинский, Матвей Степанович (1810—1866) 161, 191

Ц

Цейнер, Густав Аитон Zeuner, 1828—1907) 195, 298, 382, 390, 399
Цёлли Г. (Zoelly) 394
Цельсий, Андерс (Celsius, 1701—1744)
Циолковский, Константин Эдуардович (1857—1935) 49
Циперновский, Карл (Zipernovsky, 1853—1942) 331, 332
Цуппингер (Zuppinger) 281, 282

Ч

Чебышев, Пафиутий Львович (1821—1894) 157
Черепанов, Ефим Алексеевич (1773—1842) 52, 180, 185
Черепанов, Мирон Ефимович (1804—1849) 52, 180, 185

Чиколев, Владимир Николаевич (1845—1898) 268, 338, 444, 549

Ш

Шателен, Михаил Андреевич (1866—1957) 507
Швейггер, Иоган Христоф Соломон (Schweigger, 1779—1857) 270
Шееле, Карл Вильгельм (Scheele, 1742—1786) 146
Шиллинг, Павел Львович (1786—1837) 235, 259—264, 308, 309
Шлаттер, Иван Андреевич (1708—1763) 128—130
Шмидт, Вильгельм (Schmidt, 1853—1924) 382
Шпаковский, Александр Ильич (1823—1881) 247, 303, 371
Шредер М. 399, 401
Шретер В. Н. 534
Штейнметц, Чарльз Протеус (Steinmetz, 1865—1923) 257, 437, 439, 606, 627
Штёре, Эмиль (Störer, 1813—1890) 246, 247, 256
Штумпф (Stumpf) 172, 383
Шульгин, Евгений Яковлевич 507
Шухов, Владимир Григорьевич (1853—1933) 350, 365, 366, 372, 531
Шюле В. (Schüle) 410
Щенснович, Александр Николаевич 444

Э

Эванс, Оливер (Evans, 1755—1819) 165
Эвершед С. (Evershed) 439

Эдисон, Томас Альва (Edison, 1847—1931) 255, 307, 308, 337, 343—345, 352, 357, 462, 473, 588, 591
Эйлер, Леонард (1707—1783) 135, 139, 278—280
Эйнштейн, Альберт (1879—1955) 479
Эльстер, Юлиус (Elster, 1854—1920) 479
Энгельс, Фридрих (1820—1895) 20, 55, 60, 64, 68, 71, 82, 89, 115, 136, 198, 199, 207, 209, 216, 319, 482, 483, 485, 507
Эпикюр (311—270 до н. э.) 200
Эрикссон, Джон (Ericson, 1803—1889) 189, 191—193, 379
Эрстед, Ханс Кристиан (Oersted, 1777—1851) 204, 220
Эшер Р. 298

Ю

Юз, Девид Эдвард (Hughes, 1831—1900) 262, 461
Юинг, Т. 257, 437

Я

Яблочков, Павел Николаевич (1847—1894) 304—306, 313, 321—323, 327, 329, 337, 343, 422, 436
Якоби, Борис Семенович (1801—1874) 230—237, 246, 257, 262, 263, 269, 271—273, 309, 328, 436, 452, 503
Яковлев, Сергей Асниклитович 588
Яновский, Михаил Иосифович, (1888—1949) 412

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Часть первая

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ДО ПРОМЫШЛЕННОГО ПЕРЕВОРОТА

<i>Глава первая. Техника и закономерности ее развития</i>	<i>5</i>
1-1. Техника. История техники	5
1-2. Движущие силы и закономерности развития техники	13
1-3. Периодизация развития техники	52

<i>Глава вторая. Развитие энергетической техники до промышленного переворота</i>	<i>67</i>
2-1. Возникновение техники	67
2-2. Возникновение рабовладельческого строя	79
2-3. Развитие техники при рабовладельческом строе	82
2-4. Развитие техники при феодальном строе	91
2-5. Возникновение и начальное развитие теплоэнергетики	110
2-6. Построение универсального двигателя	120
2-7. Наука феодального общества и периода мануфактурного производства	134

Часть вторая

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В ПЕРИОД ГОСПОДСТВА УНИВЕРСАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

<i>Глава третья. Развитие теплоэнергетики</i>	<i>140</i>
3-1. Промышленный переворот XVIII в. и его развитие	140
3-2. Развитие теплоэнергетики после промышленного переворота	160
3-3. Открытие закона сохранения и превращения энергии	199
<i>Глава четвертая. Развитие электротехники</i>	<i>209</i>
4-1. Становление электростатики	211
4-2. Открытие электрического тока и изучение его свойств	214
4-3. Развитие электрических машин постоянного тока	226
4-4. Неэнергетические применения электричества и их роль в развитии электротехники	258
4-5. Возникновение электроавтоматики	264
4-6. Начало энергетических применений электричества	269
4-7. Начало электроприборостроения и электрометрии	270

<i>Глава пятая. Возникновение и развитие гидравлических турбин</i>	<i>274</i>
5-1. Создание гидравлической турбины	274
5-2. Развитие гидравлических турбин во второй половине XIX в.	287
5-3. Развитие гидравлических турбин в первой половине XX в.	295
5-4. Прочие гидравлические двигатели	299

Часть третья

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В ПЕРИОД СТАНОВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

<i>Глава шестая. Становление электротехники как самостоятельной отрасли техники. Возникновение и формирование электроэнергетики</i>	<i>301</i>
6-1. Развитие электротехники при децентрализованном производстве электроэнергии	301
6-2. Развитие электротехники в условиях начавшегося централизованного производства электроэнергии	312
6-3. Начало развития электрических станций	338
<i>Глава седьмая. Развитие теплоэнергетики</i>	<i>360</i>
7-1. Введение	360
7-2. Развитие паровых котлов во второй половине XIX в.	361
7-3. Развитие паровых машин во второй половине XIX в.	378
7-4. Возникновение паровой турбины	385
7-5. Развитие двигателей внутреннего сгорания	396
7-6. Возникновение газовой турбины	406
7-7. Развитие теоретических основ теплотехники	410
<i>Глава восьмая. Зарождение техники трехфазного тока. Начало электрификации</i>	<i>412</i>
8-1. Общие сведения	412
8-2. Изобретение асинхронных двигателей	413
8-3. Изобретение трехфазного трансформатора	426
8-4. Первая линия электропередачи трехфазным током	430
8-5. Разработка основ теории цепей, машин и трансформаторов переменного тока	436
8-6. Начало электрификации	440
<i>Глава девятая. Возникновение радиотехники и электроники</i>	<i>458</i>
9-1. Возникновение предпосылок для создания беспроводной электросвязи	458
9-2. Опыты передачи сигналов на расстояние без проводов (до середины 80 годов XIX в.)	460
9-3. Открытие электромагнитных волн и их экспериментальное исследование	463
9-4. Изобретение радио	466
9-5. Развитие радиотехники в период 1895—1918 гг.	471
9-6. Краткая характеристика основных направлений развития радиотехники с 1918 г. по настоящее время	476
9-7. Открытие фотоэлектрического эффекта	477

ПЕРИОД РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ

Глава десятая. Сущность, особенности и социально-экономические условия электрификации	481
10-1. Социально-экономические условия электрификации	481
10-2. Электрификация в капиталистических странах	487
10-3. Электрификация в СССР	500
10-4. Электрификация в зарубежных социалистических странах	520
Глава одиннадцатая. Развитие первичной энергетики в связи с электрификацией	523
11-1. Развитие энергетического машиностроения	523
11-2. Развитие гидроэнергетики	549
Глава двенадцатая. Развитие электрических станций и систем	557
12-1. Возникновение и развитие районных электростанций	557
12-2. Развитие методов и средств передачи электрической энергии на большие расстояния	579
12-3. Развитие электрических систем	586
Глава тринадцатая. Развитие основного электротехнического оборудования	603
13-1. Развитие электрических машин и трансформаторов	603
13-2. Развитие отключающих аппаратов высокого напряжения	636
Рекомендуемая литература	652
Именной указатель	654

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
335	3 сверху 12 сверху	Ст/лестб смешиваются	Ст/лестб смещаются
392	Рис. 7-20	Эльберфельдская установка — паровая турбина	Эльберфельдская установка — турбогенератор
483	сноска	перенести на стр. 482	
653	31 сверху	Ябокн	Якоби